جــامعــة حــلــب
كليَّة الهندسة الميكانيكيَّــة
قسم هندسة الطاقــة



تـأثيـر نـوع المُجمِّع الشَمسي على الأداء الحـراري لدارة تَبريـد امتصـاصيّـة

رسالــة أعدّت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الحرارية

إعداد المُهَّندس
مُحمَّد عَتابَــة

حــلــَب- 2010 م – الموافق 1431 هــ

University of Aleppo
Faculty of Mechanical Engineering
Power Engineering Department



The Effect of Solar Collector Type on the Thermal Performance of Absorption Refrigeration Cycle

Thesis prepared for Master degree in Thermal Engineering

Prepared by

Eng: Mohamed ATABA

Aleppo-2010.

جــامعـــة حـــلـــب
كليَّة الهندسة الميكانيكيَّـــة
قسم هندسة الطاقــة



تـأثيـر نـوع المُجمِّـع الشَمسـي على الأداء الحـراري لدارة تَبريـد امتصـاصيّـة

رسالـــة أعدّت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الحرارية

إعداد المهُندس

مُحمَّد عَتابَة

الدُّكتور المهندس

نبهـان خيـاطـة

أُستاذ مُساعد في قسم هَندسةُ الطاقة

(المشرف الرئيسي)

الدُّكتور المهندس

عامر حاج طالب

مُدّرس في قسم هَندسةُ الطاقة

(المشرف المشارك)

حـلـب- 2010 م – الموافق 1431 هـ

University of Aleppo
Faculty of Mechanical Engineering
Power Engineering Department



The Effect of Solar Collector Type on the Thermal Performance of Absorption Refrigeration Cycle

Thesis prepared for Master degree in Thermal Engineering

Prepared by

Eng: Mohamed ATABA

Supervised by

Dr.Eng: Nabhan KHAYAT & ***Dr.Eng:Amer HAJTALEB***

Associate professor in Power Eng Dept.
Faculty of Mechanical Eng, Aleppo Univ.

Teacher in Power Eng Dept.
Faculty of Mechanical Eng, Aleppo Univ.

Aleppo-2010.

ـ تَصــريــح ـ

أُصَـــرّح بأنّ البحـــث:

"تأثير نوع المُجمّع الشمسي على الأداء الحراري لدارة تبريد امتصاصية"

لم يسبق أن قُبل لنيل أية شهَـــادة، وهو غير مقّدم حالياً للحصول على شهادة أخرى من أي جامعة أخرى.

المرشح المهندس

محمـد عتـابـة

ـ شهَـــــادة ـ

أشهد بأنّ البحث المقدم في هذه الأطروحة **"تأثير نوع المُجمّع الشمسي على الأداء الحـــراري لـــدارة تبريـــد امتصـــاصية"** هو نتيجة بحث علمي قام به المرشح المهندس **محمّد عتابـــة**، وذلك بغية الحصول على درجة الماجستير في الهندسة الحرارية في قسم هندسة الطاقة-كلية الهندسة الميكانيكية، وإنّ أية مراجع أخرى مستخدمة في هذا العمل موثّقة ضمن نص الأطـــروحة.

المرشح المهندس	الدكتور المشرف	الدكتور المشارك
محمّـد عتابـة	**الأستاذ المساعد: نبهـان خياطـة**	**المدرس: عامر حاج طالب**

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الحرارية في قسم هندسة الطاقة تحت عنوان:

"تأثير نوع المجمع الشمسي على الأداء الحراري لدارة تبريد امتصاصية"

لجنة الحكم:

الأستاذ الدكتور: **ماردیروس آرا صايغ** كلية الهندسة الميكانيكية – جامعة حلب

الأستاذ الدكتور: **عيسى محمود** كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق

الأستاذ الدكتور: **نبهان خياطة** كلية الهندسة الميكانيكية – جامعة حلب

نوقشت هذه الرسالة وأجيزت في يوم الخميس 10/ 6/ 2010 على مدرج الدكتور أحمد فيصل العمر في كلية الهندسة الميكانيكية– جامعة حلب.

- Conformation –

I confirm the research entitled:

"Effect of Solar Collector Type on the Thermal Performance of Absorption Refrigeration Cycle"

is a scientific research prepared by ***Eng. Mohamed ATABA*** to obtain Master degree in Thermal Engineering-Power Engineering Department in the Faculty of Mechanical Engineering, and each quotation used from any other research or reference is mentioned and reported in the thesis.

The Candidate
*Eng **.Mohamed ATABA***

- Declaration –

I declare the research entitled:

"Effect of Solar Collector Type on the Thermal Performance of Absorption Refrigeration Cycle"

hasn't been reported before, and it hasn't been applied to obtain any scientific degree in any other university.

The Candidate
*Eng **.Mohamed ATABA***

*Dr.Eng.**Nabhan KHAYATA*** & *Dr.Eng.**Amer HAJTALEB***

Table of Contents

- جـَدول الـرٌّموز والمصطلحـات -
Nomenclature Table

الرمز *Symbol*	الواحدة Unit	توصيف الرمز *Definition*	الرمز *Symbol*	الواحدة Unit	توصيف الرمز *Definition*
COP	[-]	معامل الأداء	*U.A*	W/K	الناقلية الحرارية الإجمالية
$\dot{Q}_a$	[W]	استطاعة وعاء الامتصاص	F	[-]	نسبة التغطية الشمسية
$\dot{Q}_c$	[W]	استطاعة المكثف	η_C	[-]	كفاءة المجمع
$\dot{Q}_g$	[W]	استطاعة المولد	I_t	W/m^2	الإشعاع الكلي على سطح مائل
$\dot{Q}_e$	[W]	استطاعة المبخر	I_{bt}	W/m^2	الإشعاع المباشر على سطح مائل
$\dot{Q}_{shx}$	[W]	استطاعة المبادل الحراري الخاص بالمحلول	I_{dt}	W/m^2	الإشعاع المنتشر على سطح مائل
$\dot{Q}_{coll}$	[W]	الاستطاعة الحرارية المستفادة من المجمع	I	W/m^2	الإشعاع الكلي على سطح أفقي
A_{coll}	[m^2]	مساحة المجمع	$(\tau\alpha)_n$	[-]	جداء معامل النفاذية بمعامل الامتصاصية عند ورود ناظمي
U_L	W/m^2.^{o}C	معامل انتقال الحرارة الإجمالي	F_R	[-]	معامل نقل الحرارة
ε_{shx}	[-]	فعالية المبادل الحراري	β_{opt}	deg	ميل السطح المثالي
X_s	[%]	التركيز الكتلي الغني	$\dot{m}_{ref}$	[kg/s]	معدل التدفق وسيط التبريد
X_w	[%]	التركيز الكتلي الفقير	$\dot{m}_{ws}$	[kg/s]	معدل التدفق المحلول الفقير
X_i	[%]	التركيز بالنقطة i	$\dot{m}_{coll}$	[kg/s]	معدل التدفق في دارة المجمع
T_{set}	[^{o}C]	درجة الحرارة الحدية للسخان	$\dot{m}_{tank}$	[kg/s]	معدل التدفق في دارة الخزان
T_i	[^{o}C]	درجة الحرارة عند النقطة i	$\dot{m}_{ss}$	[kg/s]	معدل التدفق المحلول الغني
T_s	[^{o}C]	درجة حرارة الخزان	$\dot{m}_i$	[kg/s]	معدل التدفق بالنقطة i
h_i	[kJ/kg]	الانتالبي بالنقطة i	C_{pi}	[kJ/kg.K]	معدل السعة الحرارية النوعية بالنقطة i
P_{low}	[kPa]	الضغط المنخفض بالدارة	C_h	[W/K]	معدل السعة الحرارية للمائع الساخن
P_{high}	[kPa]	الضغط المرتفع بالدارة	C_c	[W/K]	معدل السعة الحرارية للمائع البارد
P_i	[kPa]	الضغط بالنقطة i	*FPC*	[-]	مجمع السطح المستوي

STR	[-]	النسبة الحرارية للنظام	U_b	[W/m^2.K]	المعامل الخلفي لانتقال الحرارة
U_t	[-]	المعامل العلوي لانتقال الحرارة	U_s	[W/m^2.K]	المعامل الجانبي لانتقال الحرارة
$\dot{Q}_{lb}$	[W]	الضياع الحراري من الجوانب	U_L	[W/m^2.K]	المعامل الإجمالي لانتقال الحرارة
$\dot{Q}_{ls}$	[W]	الضياع الحراري من الطرف الخلفي	T_b	[^{o}C]	درجة حرارة السطح الماص
$\dot{Q}_{lt}$	[W]	الضياع الحراري من الطرف العلوي	T_a	[^{o}C]	درجة حرارة الجو المحيط
$\dot{Q}_l$	[W]	الضياع الحراري من الإجمالي	S	[W/m]	الطاقة الممتصة لواحدة الأطوال من السطح الماص
L_w	[W]	الحمل الحراري المطلوب من الماء الساخن	F		كفاءة الزعنفة
Type 210	[-]	عنصر الدارة الامتصاصية المبرمج على TRNSYS	T_f	[^{o}C]	درجة حرارة المائع
CPC	[-]	المجمع القطعي المركب	*ETC*	[-]	المجمع الأنبوبي المفرغ

جدول بالرموز السفلية ***Subscript Table***

الرمز السفلي ***Subscript***	توصيف الرمز ***Definition***	الرمز السفلي ***Subscript***	توصيف الرمز ***Definition***
a	وعاء الامتصاص	***i***	النقطة i
shx	المبادل الحراري الخاص بالمحلول	***h***	الساخن
c	المكثف	***c***	البارد
e	المبخر	***low***	المنخفض
g	المولد	***high***	المرتفع
set	الحدية	***ws***	المحلول الفقير
coll	المجمع الشمسي	***ss***	المحلول الغني
tank	الخزان الحراري	***ref***	وسيط التبريد
s	الغني	***w***	الفقير

فهرس المحتويات
Table of Content

الملحقات

أهمية البحث وأهدافه

تُظهرُ نتائجُ الدراسات والأبحاث أن الحاجةَ إلى التبريد تتوافقُ بشكلٍ كبير مع الفتراتِ التي يكونُ فيها الإشعاعُ الشمسي في أوجِه، ومع تزايد عدد السكان و تزايد الطلب على التبريد لأغراضٍ صناعية و تجارية و منزلية فإن الحاجة إلى تطوير أنظمةِ تبريد تقللُ من استهلاك الطاقة الكهربائية ولا تسببُ تلوثاً بيئياً أصبحَ أمراً ملحاً وتحدياً كبيراً.

من هنا فإن البحث يهدف إلى دراسة وتطوير نظام تبريد شمسي يستخدم دارة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة مع محلول(ماء/بروميد الليثيوم) كزوج عامل ويُزود حرارياً عبرَ واحد من ثلاثة أنواع مقترحة من المجمّعات الشمسية بهدف نمذجة ومحاكاة عمل عناصر الدارة الرئيسية وإيجاد مجالات عملها ومقارنتها، ومناقشةُ تأثير درجات الحرارة العاملة ونوع المجمّع الشمسي على عمل النظام ونسب التغطية الشمسية وتحديد الشروط التصميمية والتشغيلية المُثلى لمتغيرات النظام لتحقيق عامل أداء مرتفع نسبياً لدارة التبريد واعتماد أصغري على التسخين الكهربائي المساعد مع مراعاة الشروط المناخية وبيانات الطقس في سورية، ومن ثم تقديم اقتراحات وتوصيات لدعم وتطوير هذا النوع من الأنظمة وإمكانية تطبيقه في بلدنا.

مُقدمَـــة

إنَ الوعي المتزايد بانحسارِ مصادرِ الطاقة العالمية، جعلَ العديد من الدول تُعيدُ النظر في سياساتها المتعلقة بالطاقة، واتخاذ التدابير الصارمة لإزالة الضياعات وترشيد استهلاك الطاقة والتوجُّه نحو تسويق الطاقات المتجددة.

تُعتَبر الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقات المتجددة التي تتميز بها البلدان العربية والتي تسهم في التقليل من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية الأحفورية الآيلة للنضوب والمضرّة بالبيئة. ومع التطور الصناعي والتجاري والتزايد السكاني المستمر لم تعدْ استخداماتُ التبريد تقتصرُ على النواحي الصناعية والتجارية بل امتدتْ لتشمل المباني والوحدات السكنية فأصبحت تشكلُ ضرورةً أساسيةً وملحة.

على الرغم من انتشار طرق التبريد بالدارات الانضغاطية التقليدية، بدأت أنظمة التبريد الامتصاصية تلقى قبولاً واسعاً كونها تستخدمُ وسائط تبريد صديقة للبيئة وفقاً لمعاهدتي مونتريال وكيوتو والتي يمكن تشغيلها بالاعتماد على مصادر طاقة بديلة متوفرة ونظيفة وغير مكلفة كالطاقة الشمسية أو الطاقة الجيوحرارية أو أي مصدرٍ للحرارة الضائعة.

يندرجُ هذا البحث في إطار الأبحاث التي تسعى إلى تطوير أنظمة التبريد الامتصاصية التي تستخدم المجمّعات الشمسية "اللواقط" كأدوات رئيسية في تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية تغذي الدارة الامتصاصية بحيث يتم تغيير نوع المجمّع الشمسي بهدف الوصول إلى أفضـل نظـام تبريد شمسي يعمل بالظروف المناخية لمدينة حلب أو المناطق المشابهة بمعامل أداء مرتفـع نسـبياً لدارة التبريد واعتماد أصغري على نظام التسخين الكهربائي المساعد.

كُرّست العديد من الأبحاث والدراسات لتطويرِ أنظمة التبريد الامتصاصية المزودة بالطاقة الشمسية، حيث أظهرت الدراسات إمكانية مساهمة الطاقة الشمسية في أنظمة تكييف المباني السكنية في سورية [31]، حيث استخدم الباحث في دراسته دارة تبريد امتصاصية ومجمّعات مسطحة مستوية مع نظام تخزين حراري للماء الساخن ونظام كهربائي مساعد، وقد توصل إلى نتيجة تؤكد إمكانية استخدام الدارة الامتصاصية في أنظمة التكييف وأن كثافة الإشعاع الشمسي في فترة الصيف قادرة على استيعاب حمولات التبريد، ولكنه لم يتطرق إلى استخدام أنواع أخرى من المجمعات الشمسية ذات مردود أعلى كما أشارت الدراسات [49,13] والتي أكدت على ضرورة اختيار

مجمّعات شمسية بمردود عالي لكي يفيد في تشغيل فعّال لنظام تبريد امتصاصي شمسي في مناخات مشابهة للمناخات السورية.

اعتمدت أبحاث عديدة على برنامج TRNSYS في محاكاة ونمذجة نظام التبريد الامتصاصي الشمسي كالبحث [41] الذي أُجري بهدف تأمين حمل تكييف لمنزل سكني في قبرص، وبهدف تسهيل عملية تشكيل نموذج المحاكاة فإن الباحث اعتمد على بيانات اسمية لوحدة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة (Type 107-Absorption Chiller) والمأخوذة أصلاً من كتالوكات تجارية ولم يحاول أن يبرمج عنصر خاص بالدارة الامتصاصية أو خواص بروميد الليثيوم –ماء من أجل تحليل حساسيتها وبالتالي الحصول على نتائج أكثر دقة.

أُجريَت أبحاث أخرى لدراسة الدارة الامتصاصية عن طريق تحليل ترموديناميكي شامل بهدف تحديد تأثير إضافة مبادل حراري بين المكثف والمبخر وتأثير درجات الحرارة العاملة والأحمال الحرارية ومعدلات التدفق المختلفة في تحسين معامل الأداء للدارة [26]، أو من خلال نمذجة الخواص الترموديناميكية لوسائط وأزواج عاملة مختلفة وإمكانية تشغيلها في الدارات الامتصاصية ومقارنتها [33,17]، كما تمت أيضاً دراسات تجريبية على وحدات تبريد امتصاصية مصغّرة تستخدم بروميد الليثيوم ماء [23,19].

أصبحت الناحية البيئية من الأمور المهمة أيضاً ، حيث أظهرت نتائج الدراسات الدور الذي يلعبه تغذية أنظمة تكييف الهواء بالطاقة الشمسية في التخفيف من الانبعاثات الكربونية والهيدروكربونية مقارنة بأنظمة تكييف الهواء التقليدية [14].

إن معظم الدراسات الحسابية أو التجريبية التي كانت تتناول أنظمة التبريد الامتصاصية الشمسية لم تتطرق إلى التأثير الذي يُحدثه تغيير نوع المجمّع الشمسي في تأمين نسب تغطية شمسية مُرتفعة وأداء مرتفع نسبياً لمعامل الأداء بالرغم من تأكيدها على أهمية المردود المرتفع للمجمّع الشمسي في تشغيل فعّال ومقبول للنظام، كما أن كثرة المتغيرات وصعوبة عملية التحليل لم يمكن الباحثين من إجراء تحليل كامل لحساسية الدارة والنظام ومحاكاة طويلة الأمد لمتغيرات وظروف تشغيل النظام وذلك بسبب عدم اعتمادهم على منهجية النمذجة والمحاكاة طويلة الأمد لأنظمة التبريد الشمسية غير المستقرة والمتغيرة مع الزمن وهذا ما جرى تطويره في هذا البحث.

من أجل نمذجة ومحاكاة النظام جرى العمل على برنامج المحاكاة TRNSYS وتطويره من

خلال إضافة عنصر الدارة الامتصاصية Type 210 بهدف التمكن من نمذجة كاملة للدارة الامتصاصية وحساب الخواص الترموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم- ماء عند أي نقطة من نقاط الدارة كخطوة أولى تمهيدية قبل البدء بتشكيل النموذج المحاكي للنظام و محاكاة عمله وتغيراته مع الزمن.

تمّ في الفصل الأول من هذه الأطروحة دراسة المجمّعات الشمسية الحرارية وأنواعها وتطبيقاتها مع التركيز على المجمّعات ذات النمط الثابت المقترحة والمستخدمة في البحث. في الفصل الثاني تمّ دراسة دارات التبريد الامتصاصية ومراحل تطور تشغيلها بالطاقة الشمسية.في الفصل الثالث تمّ دراسة أهم البرامج المستخدمة في محاكاة الأنظمة الحرارية الشمسية. أُجريَ في الفصل الرابع تحليل وتوصيف ترموديناميكي لنظام التبريد الشمسي المقترح ،أما في الفصل الخامس فقد تمّ عرض الخطوات والعناصر الرئيسية المستخدمة عند تشكيل النموذج المحاكي للنظام على برنامج TRNSYS. تمّ في الفصل السادس عرض وتحليل ومناقشة النتائج على أربع مراحل مع المقارنة ومن ثم تمّ تقديم الاستنتاجات والتوصيات لإمكانية استخدام هذا النوع من الأنظمة في بلدنا.

الفصل الأول – المُجمّعات الشمسية الحرارية وتطبيقاتها

1-1- مقدمة:

عرفَ الإنسان القديمُ الشمسَ منذ عصور التاريخ وأدرك أهميتها كمصدرٍ للطاقة والحياة، فلم يدّخر وسعاً في دراسة حركتها وكشف المزيد عن الحقائق المحيطة بها. حيث نجد الفيلسوف الإغريقي سقراط (480-399 ق.م) الذي أشار إلى ضرورة أن تكون الجدران الجنوبية للمباني مرتفعة لامتصاص أشعة الشمس والاستفادة منها في التدفئة شتاءً، وأن تكون الجدران الشمالية للمباني محدودة الارتفاع فلا تمنع نسائم الصيف الباردة من تلطيف الجو الداخلي للمباني [2]، والواقع أن هذه الفكرة تشكل إحدى الزوايا الرئيسية للاستخدام المجاني للطاقة الشمسية. نجد أيضاً العالم الإغريقي أرخميدس (287–212 ق.م) الذي استخدم المرايا العاكسة في تركيز أشعة الشمس على الأسطول الروماني المهاجم لبلاده وإحراقه دليلاً على استخدام الإنسان القديم للطاقة الشمسية بطرقٍ علمية وإدراكه خصائص الإشعاع الشمسي والأسطح العاكسة.

يعود أصل معظم أشكال الطاقة في العالم إلى الشمس، فالفحم والنفط والغاز تشكلت أساساً نتيجة تفاعلات كيميائية تحت ظروف درجة حرارة وضغط عاليين ولفترةٍ طويلةٍ من الزمن، حتى أن طاقة الرياح والمدّ البحري لهما أصلٌ شمسي كونهُما يتشكلان أصلاً نتيجة الفرق الحراري بين مناطق الأرض المختلفة [24].

يعتمد أداءُ معظم الأنظمة الحرارية التي تستخدم الطاقة الشمسية كمزوّدٍ إضافيٍ للطاقة إلى حدٍّ كبير على تجميع الإشعاع الشمسي عبر مجموعة من الأسطح والألواح (أو اللواقط) وهذا بدوره مرتبطٌ بما تقدمه الأبحاث والتقنيات الحديثة من تحسين وتطوير الخصائص البصرية والحرارية للأسطح العاكسة والماصة للإشعاع الشمسي وبالتالي تحسين كفاءة النظم الشمسية، لهذا لابد من استعراض العلاقات الأساسية التي تحدد الزوايا التي تصنعها الأشعة الشمسية على سطوحٍ مختلفة في أماكن مختلفة على سطح الأرض وفي أوقات مختلفة من السنة ومعرفة المتغيرات التي تطرأ عليها واستعراض أنواع المجمعات الشمسية الحرارية ومميزاتها وأهم التطبيقات الحرارية التي يمكن من خلالها الاستفادة من الطاقة الشمسية.

2-1- الزوايا الشمسية :

لحساب شدة الإشعاع الشمسي الذي يستقبله سطح معين موجود على الأرض يجب معرفة اتجاه الأشعة الشمسية وموقع السطح على الأرض بالنسبة للشمس والذي يتغير بدوره تبعاً لتوضُّع السطح وتغير الوقت من حيث الساعة واليوم (في الملحق– أ –موجز بالمعادلات الأساسية الخاصة بحسابات الزوايا الشمسية والإشعاع الشمسي).

1-3- المجمعات الشمسية الحرارية :

تشّكل المجمّعات الشمسية العنصر الرئيسي لأي نظامٍ أو تطبيقٍ يعتمد على الطاقة الشمسية كمصدرٍ رئيسي أو مساعد للطاقة، وهي تمثل نوعاً خاصاً من المبادلات الحرارية يقوم بتحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية ينقلها المائع الناقل(عادةً الماء أو الهواء أو الزيت).

تم عرض البيانات والمعادلات الأساسية لحسابات الإشعاع الشمسي بالملحق– أ – ، تساعد هذه المعادلات في تقدير كمية الطاقة وشدة الإشعاع الشمسي الذي يمكن الحصول عليه عن طريق أداة لتركيز الإشعاع المباشر فقط أو عن طريق سطوح تعتمد على كلٍ من الإشعاع المباشر و المشتت [24].

يمكن تصنيف المجمّعات الشمسية اعتماداً على مجالات درجات الحرارة العاملة أو اعتماداً على التطبيقات العملية لها أو تصنيفها اعتماداً على درجة تركيز الإشعاع الشمسي إلى مجمعات مركزة وأخرى غير مركزة، لكن التنوع الكبير في المجمعات الشمسية وإدخال التقنيات الحديثة في تطوير أدائها جعل من تصنيفها على أساس نظام حركتها وتعقبها لحركة الشمس الطريقة الأبسط، لهذا تم في هذا البحث تصنيف المجمعات الشمسية اعتماداً على نمط نظام الحركة إلى نوعين أساسيين:

- مجمعات ثابتة أو غير مُتتبعَة لحركة الشمس *Stationary solar collectors*
- مجمعات متحركة أو مُتتبعَة لحركة الشمس *sun- tracking collectors*

تمتلك معظم المجمعات الثابتة المساحة ذاتها التي يتم من خلالها امتصاص الأشعة الشمسية بينما تمتلك المجمعات المركزة أسطحاً عاكسة منحنية مقعرة تعمل على تركيز حزم الأشعة المباشرة الواردة من الإشعاع الشمسي على مساحة استقبالٍ أصغر مما يحقق تدفق حراري نوعي أكبر، أما المجمّعات المزودة بنظام حركة يتبع حركة الشمس فقد يكون بمحور أحادي أو ثنائي الحركة.

في الجدول(1-1) قائمة بتصنيف المجمعات الشمسية اعتماداً على حركتها مع بيانات عن درجة التركيز ومجالات درجات الحرارة لكلٍّ منها [25] .

الجدول (1-1) تصنيف للمجمعات الشمسية مع بيانات عن نوع الماص ودرجة التركيز ودرجات الحرارة العاملة

نوع الحركة *(Motion)*	نوع المجّمع *(Collector Type)*	نوع الماص *Absorber Type*	نسبة التركيز *(Concentra-tion ratio)*	مجال درجات الحرارة العاملة($^{\circ}C$) *(Temperature range)*
ثابتة ***Stationary***	- المجمع المسطح المستوي *(FPC)* ***F****lat* ***p****late* ***c****ollector* - المجمع الأنبوبي المفرغ *(ETC)* ***E****vacuated* ***t****ube* ***c****ollector* - مجمع القطع المكافئ المركبة *(CPC)* ***C****ompound* ***p****arabolic* ***c****ollector*	مسطح *(Flat)* مسطح *(Flat)* أنبوبي *(Tubular)*	1 1 5 - 1	80- 30 200 – 50 240 – 60
متتبعة لحركة الشمس – أحادية المحور ***Single-axis tracking***	- مجمعات عواكس فرينل الخطية *(LFR)* *Linear Fresnel reflector* - مجمع القطع المكافئ الخطي *(PTC)* *Parabolic trough collector* - المجمع الأخدودي ذو المستقبل الأسطواني *Cylindrical trough collector(CTC)*	أنبوبي *(Tubular)* أنبوبي *(Tubular)* أنبوبي *(Tubular)*	40 – 10 85 - 15 50 -10	250 - 60 300 - 60 400 - 60
متتبعة لحركة الشمس – ثنائية المحور ***Two-axis tracking***	- المجمعات الطبقية *(PDR)* *Parabolic Dish collectors* - مجمعات المستقبل المركزي *(HFC)* *Central Receiver collectors*	نقطي *(Point)* نقطي *(Point)*	2000-600 1500-300	1500-100 2000-150

1-3-1- المجمعات الثابتة :

يقصد بالمجمعات الثابتة *Stationary collectors* المجمعات التي توجد في مكانها بصورة دائمة ولا تكون مزوّدة بنظام حركة يتعقب حركة الشمس، يمكننا تمييز ثلاثة أنواع منها [24]:

1- مجمعات السطح المستوي ***F****lat* ***p****late* ***c****ollectors (****FPCs****)*.

2- المجمعات الأنبوبية المفرغة ***E****vacuated* ***t****ube* ***c****ollectors (****ETCs****)*

3- المجمعات القطعية المركبة الثابتة
Stationary ***C****ompound* ***p****arabolic* ***c****ollectors (****CPCs****)*

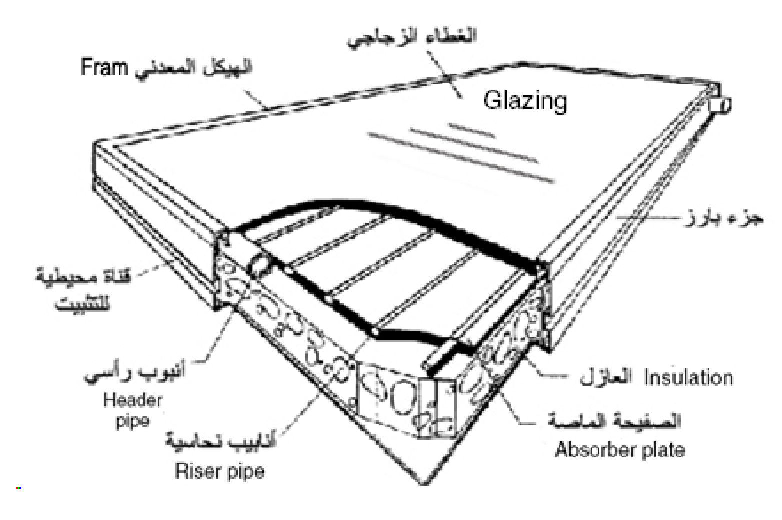
1-3-1-1- مجمعات السطح المستوي :

تقوم مجمعات السطح المستوي ***Flat plate collectors (FPCs)*** بامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية لاستخدامها في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة منخفضةً نسبياً كالاستخدامات المنزلية في تسخين الماء وبعض الأغراض الصناعية، تتميز هذه المجمعات بقلة التكلفة وبساطة التركيب. تتكون مجمعات السطح المستوي من الأجزاء الرئيسية التالية [25,2]:

- **السطح الماص:** يكون مسطحاً أو متموجاً أو مزوّداً بأخاديد، تتصل به الأنابيب أو الممرات أو الزعانف التي تحمل الناقل الحراري.
- **الغطاء:** طبقة واحدة أو أكثر من الزجاج أو من أي مادة ذات نفاذية عالية للإشعاع الشمسي و انبعاثية ضعيفة للإشعاع الحراري.
- **العازل الحراري:** لتقليل الضياعات الحرارية من جوانب وأسفل المجمع الشمسي.
- **الأنابيب** أو **الممرات** أو **الزعانف:** لإيصال أو توجيه الناقل الحراري من مدخل المجمع إلى مخرجه، وهي تتصل بدورها بأنابيب أمامية ذات قطر أكبر.
- **الهيكل:** يحمل العناصر السابقة ويقيها من الغبار والرطوبة.

تقسم مجمّعات السطح المستوي حسب نوع المائع المستخدم إلى مجمعات سائلة ومجمعات غازية، غالباً يستخدم الماء أو مزيج الماء مع مانع التجمد في المجمعات السائلة بينما يستخدم الهواء غالباً في المجمعات الغازية.

يظهر الشكل (1-1) نموذجاً لمجمع السطح المستوي:



الشكل (1-1) نموذج لمجمع السطح المستوي

عندما يجتاز الإشعاع الشمسي غطاء المجمع المتوضع فوق السطح الماص فإنه يتم امتصاص جزء كبير من الطاقة عبر هذا السطح ومن ثم تنتقل هذه الطاقة إلى الوسيط

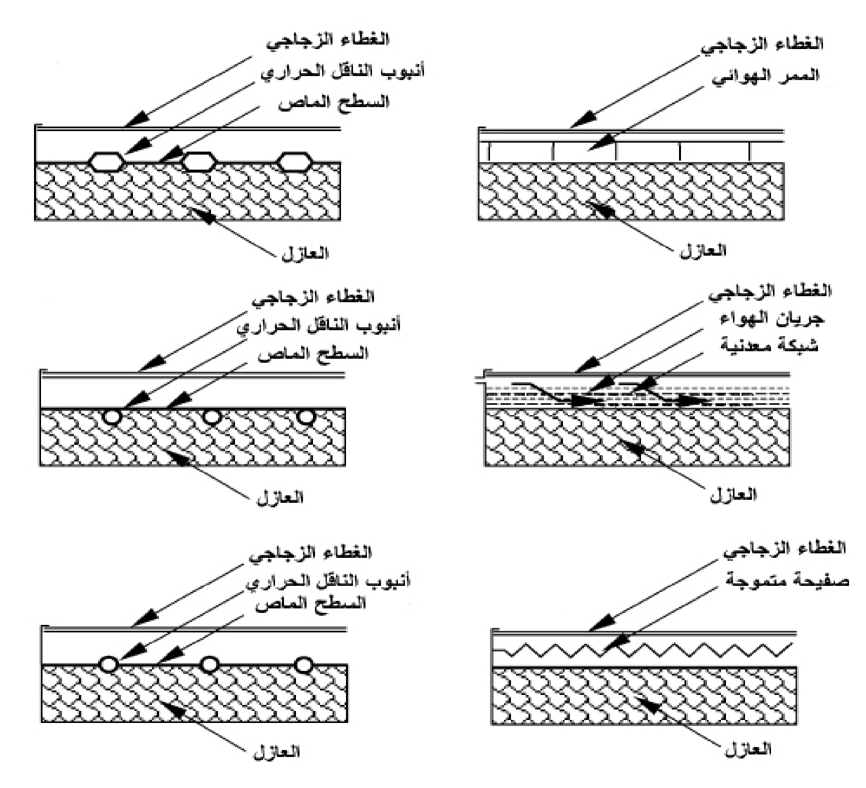
الناقل المار في الأنابيب أو الممرات ومنه إلى مستودع التخزين أو إلى الاستخدام المباشر.

يُصنع السطح الماص للحرارة من لوح مستوٍ من مادة موصلة للحرارة، تتصل به الأنابيب أو الممرات الحاملة للناقل الحراري جيداً بحيث تتوضع فوق السطح الماص أو تحته أو قد تشكل جزءاً لا يتجزأ من السطح الماص. تعتمد امتصاصية السطح الماص على طبيعة الصفيحة الماصة ولونها وعلى زاوية الورود، يستخدم عادةً اللون الأسود، أما المواد المستخدمة كصفائح ماصة فغالباً ما يستخدم النحاس أو الألمنيوم أو الستانلس ستيل.

يبيّن الشكل (2-1) بعض التصميمات المختلفة التي يكون فيها السطح الماص عبارة عن ألواح معدنية متموجة يتدفق الناقل الحراري في أخاديد التمّوجات أما في حالة المجمعات الغازية يجري الغاز في مجرى فوق اللوح الماص في الحيّز بين اللوح الماص والغطاء أو يتدفق تحت السطح الماص. تمتد من السطح الماص بعض الزعانف لزيادة معامل انتقال الحرارة داخل مجرى الغاز أو يتخذ السطح الماص شكلاً متموجاً أو أن يكون مصنعاً من مواد مسامية أو مثقبة يمر الغاز البارد من طرف إلى الطرف الآخر عبر مسام اللوح بعد أن يكتسب حرارة أثناء مروره [24].

- مجمعات السطح المستوي الغازية -





الشكل (2-1) نماذج مختلفة من مجمّعات السطح المستوي السائلة والغازية

يستخدم الزجاج أو اللدائن الشفافة كغطاء وقد يستخدم لوح واحد أو أكثر تبعاً لاستخدام المجمع وموقعه، ففي المناطق الاستوائية يكفي غطاء واحد أما في المناطق المدارية والباردة فيُستخدم غطاءان أو ثلاثة لتقليل الضياعات الحرارية بالحمل من السطح

الماص عبر مقاومة طبقة الهواء الموجدة بين طبقتي الغطاء والماص، ويراعى أن يكون الغطاء العلوي مقاوماً للصدمات ولظروف تساقط الأمطار والثلوج، في كل الحالات يجب أن يكون الغطاء من مواد ذات نفاذية عالية للإشعاع الشمسي قصير الموجة وذات انبعاثية منخفضة للإشعاع الحراري طويل الموجة، أما من أجل تخفيف الضياعات الحرارية من جوانب المجمع الشمسي وأسفله فإنه تُستخدم مواد عازلة للحرارة يعتمد اختيار نوعية وكمية هذه المواد العازلة على النواحي الاقتصادية والغرض من المجمع وموقعه وطريقة تصميمه.

يتم تثبيت مجمعات السطح المستوي في موقعٍ محدد وبشكل دائم دون تزويدها بأي نظامٍ للحركة بحيث يتم توجيهها مباشرة باتجاه خط الاستواء أي باتجاه الجنوب بالنسبة لنصف الكرة الشمالي وباتجاه الشمال بالنسبة لنصف الكرة الجنوبي.

يعتمد أداء المجمعات الشمسية عموماً على نوعية المواد المستخدمة في تصنيعه وخواصها ومدى استقرارها في الظروف البيئية المحيطة، و بهدف تحسين أداء المجمعات الشمسية فقد تمّ تطوير وتحسين الخصائص الحرارية والبصرية للأسطح الماصة والأسطح الشفافة عن طريق تغطيتها بطبقات رقيقة جداً من أكاسيد معدنية بحيث تم تسميتها الأسطح الانتقائية، تمتاز هذه الأسطح الانتقائية بتغير خواصها البصرية تبعاً لطول موجة الإشعاع الساقط عليها أو الصادر منها، حيث يمكننا تقسيم الإشعاع في التطبيقات الشمسية إلى نوعين: الإشعاع الشمسي وهي أشعة قصيرة الموجة تقع 99% من القيمة الحرارية له في مدى طول موجة 0.2-2 µm، والإشعاع الحراري طويل الموجة المنبعث من السطح الماص [2].

بالنسبة للأسطح الماصة الانتقائية فإنه يجب أن يكون لها امتصاصية مرتفعة للإشعاع قصير الموجة و انبعاثية منخفضة للإشعاع الحراري طويل الموجة، لا يوجد أي سطح ماص انتقائي بشكلٍ طبيعي وإنما يجري تحضيره صناعياً عن طريق طلي سطح معدني ناصع اللون بطبقة رقيقة جداً من أكاسيد معدنية ، كأمثلة على ذلك طلي سطح من الفولاذ اللامع بطبقة من النيكل و الكروم، أيضاً استخدام طبقة من الكروم الأسود فوق صلب مطلي بالنيكل (هذا السطح الانتقائي منتشر بكثرة تجارياً) وكذلك استخدام الكروم الأسود لطلي فولاذ مطلي بالنيكل أو نحاس مطلي بالنيكل. بالنسبة للأسطح الشفافة الانتقائية المستخدمة كأغطية للمجمعات الشمسية فإنه يتم اختيارها بحيث تتمتع بالخواص التالية[2]:

a. قيمة منخفضة لامتصاصية الإشعاع الشمسي.
b. قيمة منخفضة لانعكاسية الإشعاع الشمسي.
c. قيمة مرتفعة لانعكاسية الإشعاع الحراري الطويل الموجة والمنبعث من السطح الماص.
d. الاستقرار في الشروط المناخية المحيطة وانخفاض تكلفة التصنيع.

وجد أن الزجاج هو أنسب المواد لاستخدامها كغطاء، وأن وجود الحديد في تركيبه يؤثر مباشرة على قيمة امتصاصية الزجاج للإشعاع، بالتالي يُفضل عملياً اختيار الزجاج المحتوي على نسبة منخفضة من الحديد عن الزجاج العادي كغطاء للمجمعات الشمسية

(عملياً يمكن معرفة نسبة احتواء الزجاج على الحديد من خلال لون مقطعه الذي يميل للون الأخضر عند ارتفاع نسبة الحديد فيه).

2-1-3-1- المجمعات الأنبوبية المفرغة:

ينخفض أداء المجمّعات ذات السطح المستوي بشكلٍ كبير في الأيام الباردة أو الملبدة بالغيوم أو التي تزداد فيها سرعة الرياح، الأمر الذي استدعى تطوير هذه المجمعات البسيطة عن طريق تقليل كمية الحرارة المفقودة من السطح الماص إلى الجو المحيط بالحمل، وذلك باستخدام أنبوب يحمل الناقل الحراري داخل أسطوانة زجاجية مغلقة ومفرغة من الهواء في ذات الوقت، بشكلٍ يسمح لأشعة الشمس بالوصول إلى السطح الماص ويمنع انتقال الحرارة بالحمل من السطح الماص إلى الخارج، وبالتالي فإن الحيز المفرّغ من الهواء يخفّض من ضياعات الحمل والتوصيل وينحصر معظم الضياع الحراري بالإشعاع [11].

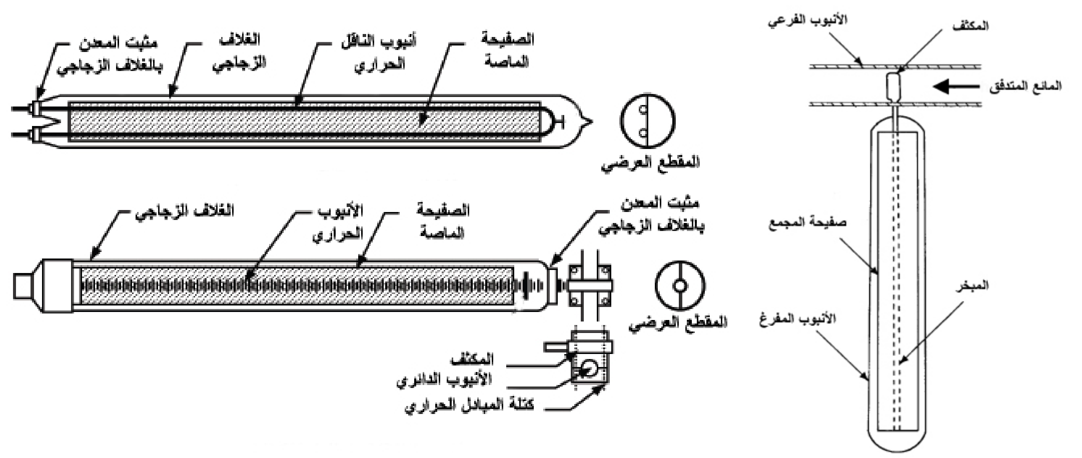
تتميز هذه المجمعات ***E**vacuated **T**ube **C**ollectors (**ETC**)* بأنبوب حراري عالي الفعالية متوضع داخل أنبوب مغلق ومخلى من الهواء، يتوضع فيه أنبوب نحاسي مغلق ومتصل بدوره بصفيحة رقيقة نحاسية تشغل السطح الداخلي للأنبوب وتشكل الصفيحة الماصة وهو يمثل المبخر[24].

يبرز عند قمة كل أنبوب جزء معدني متصل بالأنبوب المغلق يمثل المكثف، يحتوي الأنبوب الحراري على كمية صغيرة من المائع (الميتانول) بحيث يتبخر هذا السائل بفعل الحرارة الشمسية وينتقل البخار المتشكل إلى المنطقة الحرارية الأخفض أي المكثف حيث يتكاثف ويطلق طاقته الكامنة مشكّلاً السائل المتكاثف الذي يعود جزء المبخر ويكرر العملية من جديد.

عندما تكون هذه الأنابيب متجهة نحو الأعلى فإن الأجزاء العلوية منها تشّكل نوعاً من المبادلات الحرارية مع الأنبوب الرأسي الذي يتدفق فيه الماء أو الغليكول ويسحب الحرارة من الأنابيب، هذا السائل الساخن يدور عبر مبادل حراري آخر ويمنح حرارته إلى الماء الذي يتم استخدامه مباشرة أو يُخزن في مستودع التخزين.

يهدف اختيار الشكل الأسطواني للأنبوبة الزجاجية المفرغة من الهواء إلى تقليل الضغط الواقع على وحدة المساحة من سطح الأنبوبة الزجاجية نتيجة لاختلاف الضغوط على جانبيها (الضغط الجوي على السطح الخارجي والفراغ على السطح الداخلي)[24] .

كما في المجمّعات ذات السطح المستوي فإن للمجمعات المفرغة العديد من التصاميم والأشكال، في تصميم بعض هذه المجمعات يدخل الأنبوب المعدني من طرف ويخرج من طرفٍ آخر وفي البعض الآخر فإن الأنبوب المعدني يدخل ويخرج من الطرف نفسه، كما تختلف تصاميم السطوح الماصة في المجمعات المفرغة وأهم هذه التصاميم كما بالشكل (1-3) [2] :



الشكل (3-1) شكل تخطيطي للمجمعات الأنبوبية المفرغة

1- المجمّع المفرغ ذو الأسطوانتين الزجاجيتين:

يتكون من أسطوانتين زجاجيتين وأنبوب معدني يحمل السائل المراد تسخينه، الأسطوانة الخارجية تكون شفافة بينما يُطلى السطح الداخلي للأسطوانة الداخلية بمادة يجعل سطحها انتقائياً ويرفع من كفاءة امتصاص أشعة الشمس، ويثبت على جذورها الداخلية لوح رقيق من النحاس، يمر الأنبوب المعدني في الأسطوانة الداخلية بحيث يكون ملتصقاً باللوح النحاسي المثبت على السطح الداخلي للأسطوانة الداخلية وبالتالي تنتقل الحرارة عبر جدار الأسطوانة إلى لوح نحاسي ثم إلى الأنبوب فالسائل المار داخله.

2- المجمّع المفرغ ذو الأسطوانة الواحدة:

يمر الأنبوب المعدني داخل الأسطوانة المفرغة، بحيث يكون مثبتاً على صفيحة معدنية تُشكل مع الطلاء سطحاً انتقائياً، بحيث أن مرور الإشعاع الشمسي عبر جدار الأسطوانة الخارجية يسمح للسطح الانتقائي للصفيحة بامتصاص الإشعاع ونقل الحرارة إلى الأنبوب المعدني فالسائل المار فيه.

لا تخلو المجمّعات المفرغة من بعض الجوانب السلبية الناجمة عن اعتبارات التصميم أو الاعتبارات العملية، حيث أن المسافات القصيرة بين الأنابيب المفرغة في المجمع لا تستفيد من الإشعاع الشمسي الساقط عليها ولذلك فإن السطوح الانتقائية لا تستفيد من كل الإشعاع الساقط على المساحة الكلية التي يشغلها المجمع، لكن محاولات تطوير هذا النمط أزالت هذه السلبية عن طريق استخدام مجموعة من السطوح العاكسة المتراصة للاستفادة من كامل الإشعاع الشمسي الساقط على مساحة المجمع، الجانب السلبي الآخر هو نقطة اتصال الأنبوب المعدني بالأسطوانة الخارجية، الذي يشكل حلقة ضعيفة في التصميم ينجم عنها بعض المشكلات العملية مثل تسرب الهواء إلى داخل الأسطوانة وربما كسر الأسطوانة نفسها نتيجة لاختلاف معامل التمدد بين الأنبوب الحراري والأسطوانة الزجاجية.

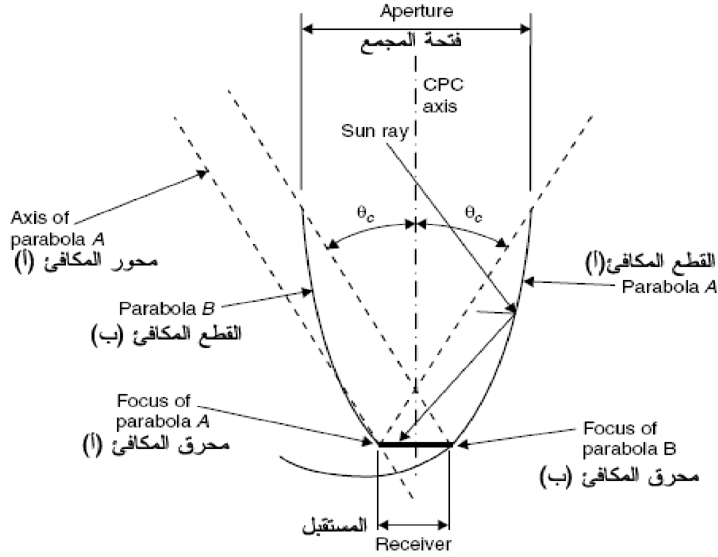
1-3-1-3- المجمعات القطعية المركبة الثابتة: *C*ompound *P*arabolic *C*ollectors

نحتاج في كثير من التطبيقات إلى درجة حرارة مرتفعة لا تستطيع المجمعات المستوية تأمينها، عندها يكون من المهم زيادة درجة الحرارة التي يتم عندها تجميع الطاقة من خلال تقليل المساحة التي تضيع منها الحرارة دون إنقاص المساحة التي يتم عندها تجميع الطاقة الشمسية وذلك بوضع بعض السطوح من مرايا أو عدسات أو عواكس بين مصدر الطاقة والمستقبل لزيادة شدة الإشعاع الشمسي الساقط على السطح الماص و بعبارة أخرى لزيادة **تركيز الأشعة**[2].

يعتبر هذا النمط من المجمّعات المركّزة للأشعة حيث من الممكن تقسيم المجمّعات المركزة للأشعة إلى نوعين رئيسين هما المُركزات غير المصورة (Non-imagining concentrators) والمركزات المُصوّرة imagining concentrators (أي التي تكوّن صورة لقرص الشمس على السطح الماص).

تعتبر مجمعات الـــ ***CPC*** من المجمعات غير المصوّرة وتمتاز بقدرة عالية على استقبال كامل الإشعاع الوارد ضمن مجال واسع من الزوايا عبر فتحة الدخول وتحويله إلى السطح الماص المتوضع أسفل المجمع دون الحاجة إلى تتبع الشمس.

يوضح الشكل (1-4) مقطعاً في مجمع القطع المكافئ المركب:



الشكل (1-4) مقطع في المجمع القطعي المركب– الكامل والمتماثل ذي المستقبل المسطح

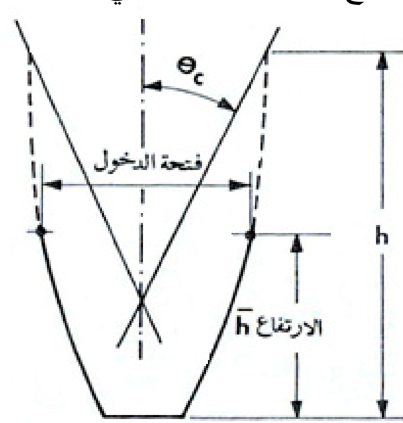
يتكون كل جانب منه من جزء من قطع مكافئ بحيث تقع بؤرة القطع الأيمن المركب على سطح القطع الأيسر وكذلك تقع بؤرة القطع الأيسر على سطح القطع الأيمن ويمتد المستقبل المستوي بين البؤرتين، ويمتد كل جانب حتى يتوازى سطح القطع مع محور المجمع المركب، تسمى الزاوية بين محور المجمع المركب والخط الواصل بين البؤرة والحافة المواجهة لفتحة الدخول بنصف زاوية قبول θ_c(*Half-acceptance angle*)، وتبعاً لذلك عندما يكون المجمع ثابتاً فإن الإشعاع يتم استقباله فقط خلال الساعات التي

تكون فيها الشمس ضمن زاوية القبول $\pm \theta_c$. إن نسبة التركيز النظرية C لعدسة أو عاكس تعتمد على زاوية القبول وفق المعادلة [2]:

$$C = \frac{1}{\sin \theta_C} \quad (1\text{-}1)$$

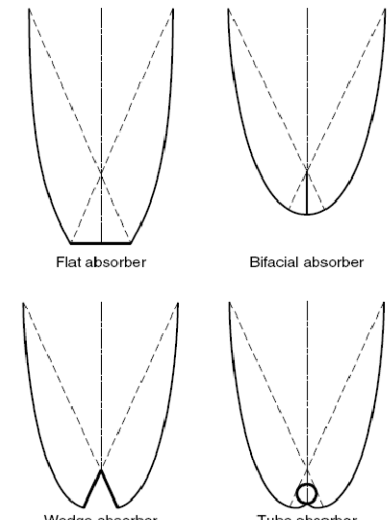
وتمثل النسبة بين مساحة فتحة الدخول ومساحة الفتحة التي تحتوي الأشعة المنعكسة، أما نسبة التركيز المؤثر C_e لمجمع شمسي فإنها تمثل نسبة مساحة فتحة الدخول إلى مساحة الماص غير المعزول، وبالطبع عندما تمتلك العدسات أو المرايا بعض العيوب فإن كفاءتها البصرية تكون أقل من 100% وبالتالي تقل بذلك كفاءة تركيز الأشعة وهنا يبرز مفهوم التركيز المفيد C_u لمجمع شمسي، الذي يساوي حاصل ضرب نسبة التركيز المؤثر C_e بالكفاءة البصرية الكلية، حيث تمثل الكفاءة البصرية الكلية حاصل جداء الانتقالية والانعكاسية والامتصاصية للضوء على جميع السطوح بين فتحة الدخول والماص.

عند الحافة العليا من القطع المكافئ المكوّن للمجمع يكون السطح العاكس موازياً لمستوى التماثل المحوري وتكون كمية الإشعاع المنعكس صغيرة مقارنة بالجزء السفلي منه بحيث يمكن تقصير ارتفاع القطع المكافئ من h إلى $\bar{h}$ لتوفير السطح العاكس، عندها يُطلق على هذه الحالة بالمجمّع المقطوع ، كما بالشكل التالي:



الشكل (1-5) المجمع القطعي المركب المقطوع

يمكن للماص أن يأخذ أشكالاً متنوعة منها المسطح، ثنائي الوجوه، خابور wedge، أو أسطواني [25] كما هو موضح بالشكل التالي [26]:



الشكل (1-6) أشكال متنوعة من الماص في مجمعات القطع المكافئ المركبة

من الممكن في بعض النماذج تصنيع مجمعات أنبوبية مفرغة يكون فيها شكل العاكس على شكل قطع مكافئ [25]، يحدث في هذا النوع الخاص تركيز كبير وتصل درجات الحرارة إلى 300°C.

1-3-2- المجمّعات الشمسية القطعية المركّزة والمتتبعة للشمس :

في هذا النوع من المجمّعات يتم تزويد الأسطح العاكسة للإشعاع الشمسي بنظام تتبع دقيق لحركة الشمس وهذه يمّكن المجمع بدوره من استقبال أكبر كمية من الإشعاع المباشر مما يؤدي إلى زيادة تركيز الأشعة وزيادة كفاءة هذه المجمعات بهدف استخدامها في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة عالية. نتيجة الحركة الظاهرية للشمس فإن ثمة طريقتين يمكن من خلالهما تتبُّع الشمس[24].

الطريقة الأولى هي طريقة ثنائية المحاور وتعتمد على تحديد الارتفاع وزاوية السمت الأفقية بحيث تمكّن المجمع المركّز من أن يتبع حركة الشمس بصورة كاملة.

الطريقة الثانية هي تتبُّع الشمس بمحور واحد، أي إن المجمع يتحرك متتبعاً الشمس باتجاهٍ واحد فقط من الشرق إلى الغرب أو من الشمال إلى الجنوب.

تم تصنيف مجمعات الـــ *CPC* ضمن المجمعات الثابتة إلا أن بعض أشكال هذا النوع وخاصة المجمع القطعي المركب ذي المستقبل الأسطواني تكون مزوّدة بنظام تتبع لحركة الشمس، الأمر الذي يجعلها من المجمعات المركّزة المتحركة.

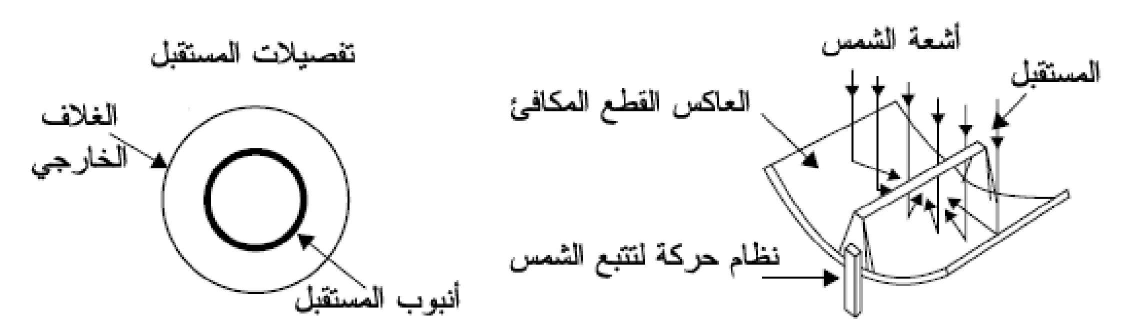
على الرغم من أن هذه المجمعات تستفيد من الإشعاع المباشر فقط ولا تستطيع تركيز الإشعاع المنتشر (المشتت)،إلا أنّ فوائدها ومميزاتها تكون كبيرة، ففي الوضع الذي يمتد فيه السطح المستقبل بين الشرق والغرب فإن المجمع عندها يحتاج إلى أن يتتبع حركة الشمس في المستوي الرأسي فوق الأفق الجنوبي فيتم بذلك استقبال الإشعاع المباشر لفترات طويلة وبصورة مباشرة [2].

يمكن تصنيف المجمعات المركّزة على أنها مجمعات غير مصورة أو مصورة، يعتمد هذا على ارتسام صورة الشمس على المستقبل أم لا، فالمجمع المركّز المنتمي للنمط الأول أي غير المصورة هو الــ *CPC* بينما كل أنواع المجمعات المركّزة الأخرى هي من النمط المصور، أهم الأنواع المدرجة تحت هذا التصنيف[24] هي:

a) مجمّعات القطع المكافئ الخطية *Parabolic trough collectors*
b) مجمّعات فرينل *Fresnel collectors*
c) المجمّعات الطبقية *Dish collectors*
d) مجمّعات المستقبل المركزي *Central Receiver collectors*

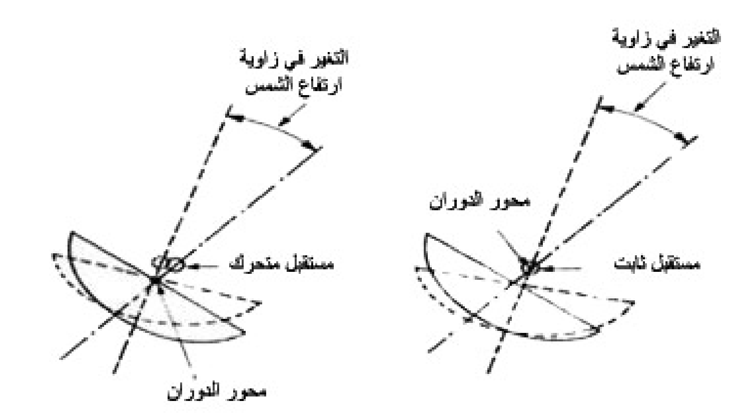
a) مجمّعات القطع المكافئ الخطية :

يستخدم مع التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة تصل لـــ 400 درجة مئوية، يتألف هذا المجمع من صفيحة من مادة عاكسة على شكل قطع مكافئ وأنبوب معدني أسود مُغطى بأنبوب زجاجي لتخفيض الضياعات الحرارية، يتوضع هذا الأنبوب على طول الخط المحرقي للمستقبل[24] كما هو موضح في الشكل (1-7) .



الشكل (1-7) مجمعات القطع المكافئ الأخدودية

إن هذا المجمع يمكن أن يتوضع بطرق متعددة أهمها الوضع شرق−غرب والوضع شمال −جنوب [2]. في الوضع شرق −غرب يكون المحور الطولي أفقياً ويمتد من الشرق إلى الغرب ويتم تغيير زاوية الارتفاع الشمسي عن طريق تصحيح اتجاه المجمع وتتبع حركة الشمس، إما أن يكون المجمع (السطح العاكس والمستقبل) كتلة واحدة تتحرك كجسم واحد وإما أن يكون المستقبل ثابتا ويكون السطح العاكس متحركاً حول الخط المحرقي كما هو موضح في الشكل (1−8):



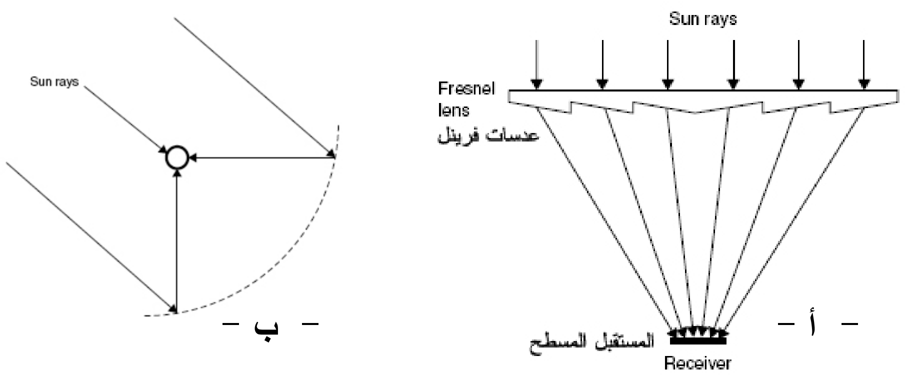
شكل(1-8) طرق تتبع الشمس في المجمعات الأخدودية المكافئة

أما الوضع شمال–جنوب: يمتد المحور الطولاني للمجمع من الشمال إلى الجنوب بحيث يدور المجمع حول المحور الطولاني 180 درجة كل يوم ليتتبع حركة الشمس من الشرق إلى الغرب مع ضرورة تعديل زاوية ميل المجمع على مدار العام لتحسين كفاءة المجمع، حيث تبدو الوضعية شمال–جنوب أكثر كفاءة في التجميع لكن وجود زاوية الميل وقابلية التعديل يجعل الهيكل الحامل للمجمع والتوصيلات أكثر كلفة.

b) مجمّعات فرينل :

وفقاً لقوانين الضوء والبصريات فإن العدسات الدائرية تُجمّع الأشعة المتوازية في نقطة بينما العدسات الأسطوانية تُجمّع الأشعة المتوازية في خط، عدسات فرينل لها الخاصية نفسها في تجميع الأشعة لكنها تُصنع من مواد لدنة شفافة تجعلها قليلة الكلفة وخفيفة الوزن، تتكون عدسات فرينل من أجزاء متوالية تسمى أوجهاً تميل بزوايا معينة لتكسر الأشعة إلى البؤرة التي يوضع بها الماص[2].

هناك نوعان من مجمعات فرينل مجمعات عدسات فرينل *Fresnel lens collectors* التي تظهر في الشكل (1-9 -أ) وعواكس فرينل الخطية *Linear Fresnel collectors* التي تظهر في الشكل (1-9 - ب).



الشكل (1-9) مجمعات فرينل (أ) مجمعات عدسات فرينل، (ب) مجمعات مكافئة أخدودية تستخدم عواكس فرينل الخطية.

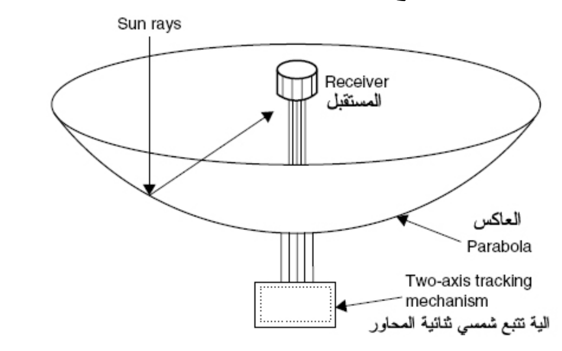
الميزة الكبيرة لهذه المجمعات أنها تستخدم عواكس محدبة أو مستوية أقل ثمناً من العواكس الزجاجية القطعية إضافة إلى أنه يتم تركيبها قريبة من الأرض مما يقلل التكاليف الإنشائية[25]. تستخدم في محطات الطاقة حيث يوضع المستقبل الماص بشكل ثابت في أعلى برج مع تزويد العواكس بأنظمة حركة ثنائية المحاور.

c) المجمعات الطبقية

تستخدم المجمعات الطبقية للوصول إلى درجات عالية في تطبيقات توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية[2]، لكن من مشاكل المجمعات الطبقية حاجتها إلى أنظمة تتبع شمسي معقدة أكثر ومكلفة أكثر مقارنةً بالمجمعات الأخدودية ذات الأنابيب المستقبلة الأسطوانية.

في الشكل (1-10) توضيح لعملية تركيز العاكس للإشعاع الشمسي باتجاه المستقبل المتوضع على نقطة محرق الطبق [25].

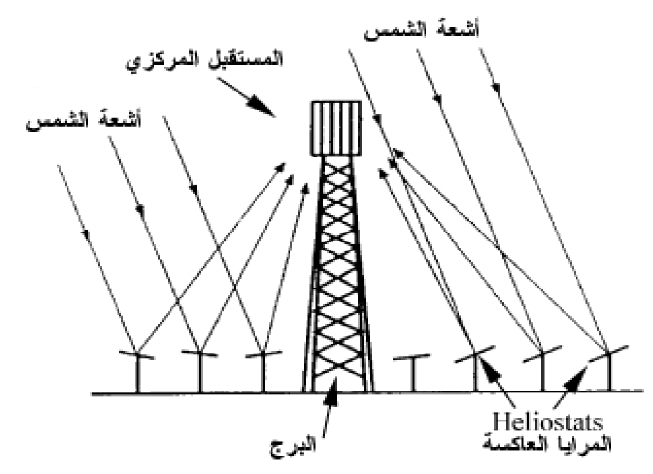




الشكل (1-10) مجمع طبقي

d) منظومات المستقبل المركزي

تستخدم مجموعة من المرايا العاكسة المتوضعة أفقياً على سطح الأرض والموجهة بحيث تتبع الشمس في تركيز الإشعاع الشمسي الوارد عليها على مستقبلٍ مركزي موضوع في برج استقبال عالٍ، أما محطة توليد القدرة فتوجد على سطح الأرض أسفل البرج، حيث يُضخ المائع الناقل للحرارة إلى المستقبل المركزي ليتم تسخينه ومن ثم يعود إلى محطة توليد الطاقة. يسمى الواحد من هذه المرايا الهليوستات، تكون كل مرآة قابلة للحركة حول محورين متعامدين لتعكس أشعة الشمس في اتجاه المستقبل، يتراوح قيمة معدل تدفق الإشعاع الشمسي الوارد على وحدة المساحة من المستقبل (kW/m^2) 200 إلى (kW/m^2)1000، يؤمن هذا التدفق الكبير درجات حرارة تزيد عن 1500 درجة مئوية.



الشكل (1-11) نظام المستقبل المركزي

إن المجمعات الشمسية بتصاميمها وأشكالها المختلفة تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية عند درجات حرارة مختلفة وبكفاءات مختلفة وتكاليف مختلفة، بالتالي فإن تحديد النوع المطلوب لتحقيق الغرض المطلوب بكفاءة وفعالية عالية يتطلب دراسة دقيقة وتفصيلية، تأخذ بعين الاعتبار خصائص الطاقة المطلوبة والشرط البيئية والمناخية في المنطقة بالإضافة إلى الجوانب الاقتصادية.

1-4- الأداء الحراري للمجمعات الشمسية :

يعبر مردود المجمع الشمسي عموماً عن نسبة الاستفادة من مجمل الطاقة الشمسية الواردة إلى سطح المجمع ويمثل أيضاً نسبة الطاقة الحرارية المفيدة والمنتقلة إلى الناقل الحراري إلى الإشعاع الشمسي الكلي الوارد إلى المجمع الشمسي، وبالتالي بالنسبة للمجمع المستوي فإن حساب المردود يتطلب حساب معاملات الضياع الحراري من السطوح العلوية والجانبية والخلفية للسطح الماص للمجمع A_c ومن ثم حساب مردود نقل الطاقة الشمسية الممتصة من السطح الماص إلى المائع الذي يجري داخل الأنابيب بحيث نحصل على مقدار الطاقة الحرارية المفيدة الواصلة إلى المائع داخل الأنابيب وبالتالي الطاقة الحرارية المستفادة من المجمع الشمسي.

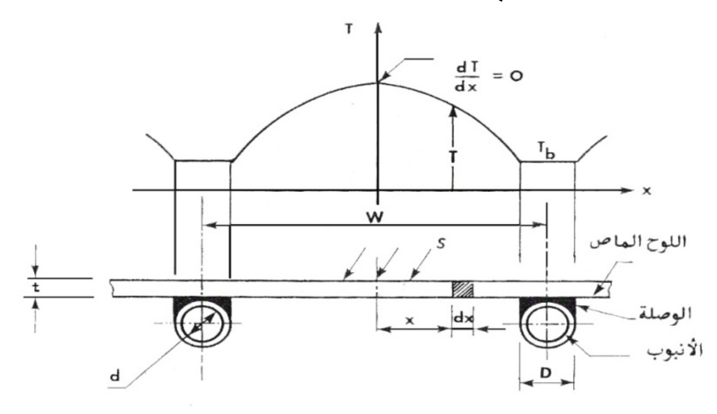
يمكن حساب الضياع الحراري من مجمع السطح المستوي من خلال معرفة المعامل الكلي للضياع الحراري U_L و مساحة سطح الماص للمجمع نتيجة التبادل الحراري بالحمل بين سطح الماص ذي درجة الحرارة T_b والجو المحيط ذي درجة الحرارة T_a، أما الضياع الحراري الإجمالي من المجمع فإنه يتم نتيجة الضياع عبر العازل السفلي والسطح العلوي للغطاء وأيضاً من خلال الأسطح الجانبية بحيث يمكن كتابة المعدل الكلي للحرارة المفقودة من المجمع بالمعادلة [2]:

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_{lb} + \dot{Q}_{ls} + \dot{Q}_{lt} = U_L.A_c(T_b - T_a) \quad [W] \qquad (1-2)$$

$$U_L = U_b + U_s + U_t \qquad \left[\frac{W}{m^2.K}\right] \qquad (1-3)$$

حيث U_b ، U_s ، U_t المعامل الخلفي والجانبي والعلوي لانتقال الحرارة بالترتيب .

يوضح الشكل (1-12) مقطعاً في اللوح الماص مع الأنابيب وتوزيع درجات الحرارة، حيث يكون السطح الماص غالباً في المجمعات المسطحة المستوية لوحاً مستوياً تتصل به الأنابيب التي تحمل الناقل الحراري.



الشكل (1-12) مقطع في السطح الماص مع الأنابيب وتوزيع درجات الحرارة

إن مردود نقل الطاقة من السطح الماص إلى المائع داخل الأنابيب يمكن حسابه بفرض أن كمية الطاقة الممتصة ثابتة على كل السطح الماص $(S = \tau\alpha . I_t)$ وبفرض أن الأنابيب ذات قطر داخلي d وخارجي D موضوعة على مسافات متساوية قدرها W وأن سماكة الصفيحة الماصة t عندها تكون كمية الطاقة المفيدة الواصلة إلى الناقل الحراري داخل الأنابيب وفق المعادلة [2]:

$$\dot{Q}_u = [F.(W - D)].[S - U_L(T_b - T_a)] \qquad [\text{W/m}] \qquad (1\text{- }4)$$

حيث F كفاءة الزعنفة و تمثل النسبة بين كمية الحرارة الفعلية التي تصل إلى قاعدة اللوح وكمية الحرارة التي ستصل هناك إذا افترضت درجة حرارة السطح الماص ثابتة عند T_b. تنتقل الحرارة إلى المائع عن طريق التوصيل في منطقة الاتصال بين اللوح الماص والأنبوب ثم عن طريق الحمل داخل الأنبوب بحيث يمكن كتابة المعادلة[2]:

$$\dot{Q}_u = \frac{T_b - T_f}{R_b + \left(\frac{1}{h_f \pi d}\right)} \qquad (1\text{- }5)$$

حيث h_f معامل الحمل الحراري للمائع داخل الأنبوب .

R_b المقاومة الحرارية لمنطقة الاتصال بين الأنبوب والسطح الماص والتي من الممكن إهمالها إذا كان الاتصال جيداً ومباشراً كاللحام أو أن يكون الأنبوب جزءاً لا يتجزأ من اللوح.

ولما كان المائع يدخل المجمع بدرجة حرارة T_i ويخرج بدرجة حرارة أعلى T_O عندئذ يمكن تطبيق معادلات التوازن الحراري على طول محور الأنبوب بفرض حالة الاستقرار

لمائع سعته الحرارية النوعية C_{PF} لنحصل على الطاقة الحرارية المفيدة من المجمع الشمسي المستوي وفق المعادلة [2]:

$$\dot{Q}_u = F_R . A_C . [S - U_L(T_i - T_a)] \qquad [W] \qquad (1\text{- }6)$$

حيث F_R معامل نقل الحرارة و يمثل كمية الحرارة المفيدة الفعلية المنقولة بالمائع كنسبة من كمية الحرارة المفيدة عندما يكون المجمع عند درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة المائع عند دخول المجمع، ويرتبط هذا العامل بعامل كفاءة السطح الماص وعوامل أخرى وفق المعادلة [2]:

$$F_{\mathrm{R}} = \frac{C_{PF}}{U_L} . (1 - e^{-\frac{U_L . \grave{F}}{C_{PF}}}) \qquad (1\text{- }7)$$

حيث $\grave{F}$ معامل كفاءة السطح الماص، الذي يمثل النسبة بين كمية الحرارة الفعلية المنقولة إلى السائل داخل الأنبوب إلى كمية الحرارة التي تصله إذا كانت درجة حرارة السطح ثابتة عند درجة حرارة السائل يعطى بالمعادلة[2] :

$$\grave{F} = \frac{1/U_L}{W\left[\frac{1/U_L}{F(W-D)+D} + R_b + \frac{1/h_f}{\pi d}\right]} \qquad (1\text{- }8)$$

وبالتالي للحصول على معامل نقل حرارة عالٍ يجب أن يكون معامل الضياع الحراري صغيراً ما أمكن وأن تكون السعة الحرارية للمائع كبيرة.

تمثل كفاءة المجمع النسبة بين الحرارة المستفادة التي تصل المائع لكل وحدة مساحة من المجمع والإشعاع الكلي الساقط على السطح العلوي للمجمع وتعطى بالمعادلة:

$$\eta_C = \frac{\dot{Q}_u / A_c}{I_t} \qquad (1\text{- }9)$$

بالتعويض نحصل على المعادلة :

$$\eta_{\mathrm{c}} = F_R . (\tau\alpha) - F_R . U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I_t}\right) \qquad (1\text{- }10)$$

يعتمد المردود على العديد من العوامل التصميمية والشروط التشغيلية ولكن إذا افترضنا أن قيم $F_R . (\tau\alpha)$ و $F_R . (\tau\alpha)$ ثابتة عندئذ يعتمد المردود فقط على شروط التشغيل، تسمى هذه المعاملات بالمعاملات المحددة لأداء مجمعات السطح المستوي المثالية أما المعادلة الأخيرة فتسمى بمعادلة (هوتيل – ويلر – بلس Hottel – Whillier – Bliss).

يتبع حساب الأداء الحراري للمجمعات المركزة الشمسية نفس طريقة حساب مجمعات المستوية حيث يتم حساب الطاقة الممتصة S لكل وحدة مساحة من فتحة الدخول في حالة المجمعات القطعية المركزة اعتماداً على كلٍّ من المركز والمستقبل ومن ثم حساب الضياع الحراري بدلالة معامل الضياع الحراري U_L [2]، لكن نظراً لاختلاف خواص وتصاميم مجمعات التركيز الشمسي عن المجمعات ذات السطح المستوي فإنه

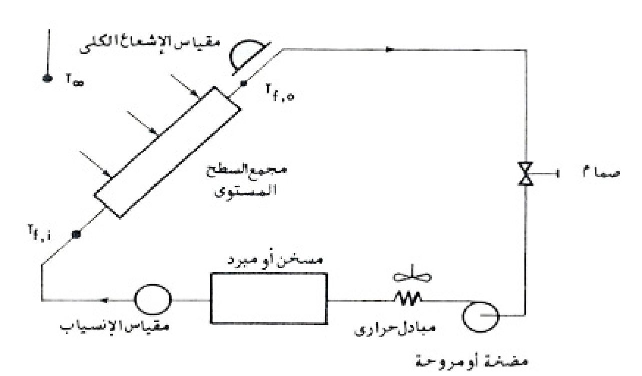
يصعب وضع طريقة عامة لاستنتاج المردود. لهذا يجب تحليل كل شكل على حدة وتحديد قيم الثوابت التي تدخل في علاقة المردود.

1-4-1- اختبار المجمعات الشمسية :

أ- اختبارات الأداء الحراري :

تجري اختبارات الأداء الحراري للمجمعات الشمسية بطريقة قياسية بموجب مواصفات قياسية تم وضعها من قبل المكتب القومي للمواصفات القياسية (*NBS*) والجمعية الأميركية لمهندسي التدفئة والتبريد والتكييف(*ASHRAE*) لإجراء مثل هذه الاختبارات بطريقة موحدة.

يوضح الشكل (1-13) دارة لاختبار أداء مجمعات السطح المستوي، حيث يتم قياس الإشعاع الشمسي الساقط وفرق درجات الحرارة عند الدخول والخروج من المجمع ودرجة حرارة الجو المحيط وقياس سرعة الرياح في الموقع، من أجل قيم متغيرة من درجات حرارة الدخول والخروج ولمعدل تدفق واحد، يتم الحصول على 16 نقطة على الأقل لرسم منحني الكفاءة، حيث تمثل كل نقطة كفاءة المجمع خلال مدة خمس دقائق على الأقل[2].



الشكل (1-13) دارة لاختبار أداء مجمعات السطح المستوي

يجب مراعاة النقاط التالية عند إجراء الاختبار:

- أن يتم تركيب المجمع وتكون زاوية سقوط الإشعاع في حدود 45 °C عن الشاقول.
- أن تتغير درجة حرارة المائع عند الدخول عند أربع قيم لكي نحصل على مدى مناسب من $\left(\frac{T_i - T_a}{I_t}\right)$ حيث تؤخذ أربع قراءات لكل قيمة من درجة حرارة الدخول اثنتان قبل الظهر الشمسي واثنتان بعده.
- يجب ألا يتغير معدل تدفق المائع ضمن حدود ±1%.
- يجب ألا تتعدى سرعة الرياح 4.5 (m/s).

ب – اختبارات التحمل :

تُجرى هذه الاختبارات لتحديد مقدار التحمل والأمان، نذكر بعض هذه الاختبارات على سبيل المثال [2]:

- اختبار عدم التدفق لمدة ثلاثين يوماً: ويهدف إلى تحديد المشاكل المتوقعة عند عدم تشغيل المجمع لمدة قصيرة.
- اختبارات الصدمة الحرارية: ويهدف إلى إثبات مقدرة المجمع على تحمل الصدمات الحرارية الناشئة عن سقوط المطر الكثيف على سطح المجمع الساخن، أو ملء المجمع الساخن بماء بارد.
- اختبارات المطر: يهدف إلى إثبات مقاومة المجمع لتسرب الماء إلى داخله عند تعرضه لمطر غزير تسوقه رياح شديدة.
- اختبار التسرب، خاصة تحت ظروف الضغوط العالية.
- اختبار الدارة الحرارية: لإثبات قدرة المجمع على تحمل الإجهادات الحرارية الناتجة عن فروق التمدد الحراري.

5-1 – تخزين الطاقة الشمسية :

تتغير شدة الإشعاع الشمسي أثناء النهار ومن الصيف إلى الشتاء، كذلك فإن معظم التطبيقات التي تعتمد على الطاقة الشمسية تحتاج إليها عموماً بمعدلاتٍ غير ثابتة، و في الحالات التي لا يتوافق فيها مقدار الطاقة الشمسية المتوفرة مع المقدار المطلوب فإن الطاقة الشمسية تستخدم مع مصدر طاقة مساعد وبهدف تقليل الاعتماد على هذا المصدر المساعد فإنه من الممكن تخزين الطاقة الشمسية في أوقات توافرها وعندما يزيد ما يتم تجميعه منها عن الاستهلاك الفعلي المطلوب.

يمكن تخزين الطاقة الشمسية بعدة طرق منها التخزين الحراري، التخزين الكيميائي، والتخزين الميكانيكي [2].

التخزين الحراري للطاقة الشمسية: يتم تحويل الطاقة الشمسية التي تم تجميعها إلى طاقة حرارية تنتقل إلى وحدة التخزين ويتم تخزينها على شكل طاقة داخلية بحيث ترتفع درجة حرارة وسيط التخزين أو يتحول من حالة إلى أخرى (ينصهر).

ينقسم التخزين الكيميائي للطاقة الشمسية إلى طريقتين: كيميائي حراري أو كيميائي كهربائي. في الطريقة الكيميائية الحرارية تستخدم الطاقة المراد تخزينها في تفاعلات كيميائية ماصة للحرارة لإنتاج مواد يمكن تخزينها وعند الحاجة لاسترجاع الطاقة فإن المواد الناتجة تستخدم في تفاعلات عكسية ناشرة للحرارة، أما في الطريقة الكهركيميائية فإن الطاقة المراد تخزينها تستخدم في عملية التحليل الكهربائي للماء أو لحمض الكبريتيك لإنتاج الهيدروجين الذي يمكن تخزينه ونقله إلى أن يتم حرقه لاستعادة الطاقة المختزنة.

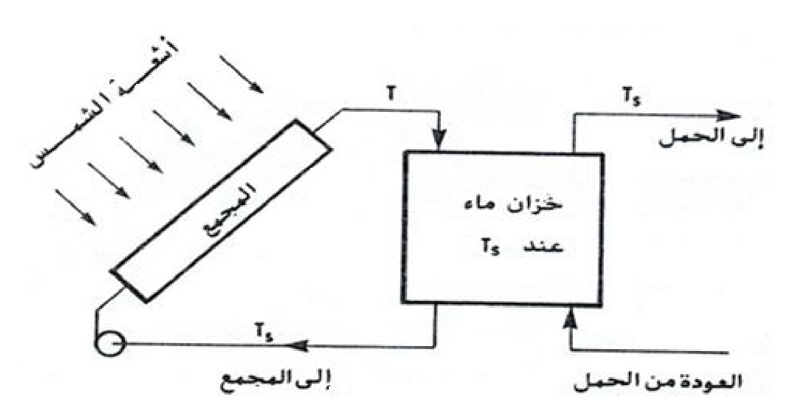
في طريقة التخزين الميكانيكية تتحول الطاقة المراد تخزينها إلى عمل ميكانيكي بحيث يتم استرجاعها لاحقاً، مثل عملية ضخ الماء إلى مكان مرتفع ثم استعادته وقت الحاجة أو أحياناً يتم ضغط الهواء وتخزينه إلى وقت استخدامه لاستعادة الطاقة المختزنة.

من الأمور الواجب تحديدها عند اختيار طريقة تخزين أي نظام: درجة حرارة التخزين التي تعتمد على نوع الاستخدام والمدة التي ستظل فيها الطاقة مختزنة، من الممكن توفر أكثر من خيار لتخزين الطاقة في أنظمة الطاقة الشمسية وعلى المصمم اختيار الأنسب فمثلاً في أنظمة التبريد الشمسي الامتصاصي يمكن تخزين الطاقة الحرارية بعد المجمع الشمسي أو تخزين البرودة في خزان منخفض درجة الحرارة (أقل من درجة حرارة الجو)، هذه البدائل يختارها المصمم مع الأخذ بالحسبان السعة والتكلفة والأداء.

1-5-1- التخزين الحراري للطاقة الشمسية :

1-1-5-1- التخزين في السوائل :

يعتبر التخزين الحراري في السوائل من أكثر الطرق المستخدمة ويعتبر الماء من أنسب مواد التخزين الحراري ، وذلك لأن الماء حتى درجة حرارة [°C] 95 يتملك سعة تخزينية حجمية مرتفعة إضافة إلى توفره. حيث تضاف الطاقة وتستخرج بإضافة مادة التخزين نفسها أو سحبها. الشكل (1-14) يوضح منظومة تقليدية تستخدم الماء لتخزين الطاقة الحرارية [2].



الشكل (1-14) نظام بسيط لتخزين الماء الساخن

من الممكن تصميم خزانات السوائل بطريقة التوضُّع الطبقي حيث تكون الطبقة العليا من السائل في الخزان أسخن من الطبقة الأسفل منه، ويتم تقسيم الخزان لعدة طبقات مع تحديد معادلات توزع درجة الحرارة لكل جزء بدلالة الزمن بعد تحديد كيفية توزع السائل الداخلي للخزان على الطبقات المختلفة (في أغلب الأحيان يضاف السائل العائد من المجمع إلى الطبقة ذات درجة الحرارة الأقل ما أمكن من حيث درجة الحرارة لتفادي الفروقات في الكتل النوعية).

إنّ طريقة التوضُّع الطبقي في الخزان الحراري تحسّن أداء هذا الخزان بسبب وجود تدرجات في درجات الحرارة مع ضرورة أن تكون سرعة جريان المائع صغيرة

حتى لا تحدث اضطرابات تؤدي إلى المزج في الخزان، وأن تكون الخزانات عالية ورفيعة (نسبة الارتفاع إلى القطر ثلاثة أو أكثر) بجدران سميكة ومعزولة عزلاً حرارياً جيداً [2].

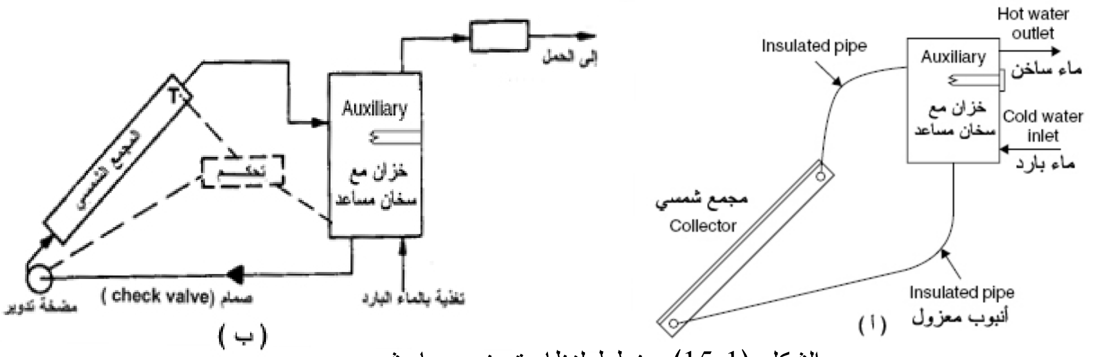
1-5-1-2- التخزين في المواد الصلبة :

تستخدم هذه الطريقة غالباً مع الأنظمة الشمسية التي تستخدم الهواء كوسيط عامل ضمن المجمعات، وفيها يتم رصُّ الحصى أو الأحجار الكروية المتماثلة بالحجم تقريباً ويمرر الهواء الساخن خلال الحصى من أعلى إلى أسفل (غالباً)، حيث تفقد حرارته ويمنحها إلى المواد الصلبة المرصوصة ويخرج من أسفل الحاوية إلى المجمع حيث يعاد تسخينه من جديد، وتقوم مروحة بدفع الهواء بسرعة متساوية تقريباً على كل مقطع من الصفوف الحجرية، إن من أنسب المواد الصلبة التي يمكن استخدامها في التخزين الحراري الأحجار وكسر الزجاج كونها متوفرة وقليلة الثمن وذات عمر تشغيلي كبير دون صيانة.

1-6- التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية

1-6-1- تسخين الماء بالطاقة الشمسية :

يعتبر من أكثر التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية انتشاراً واستخداماً[2]، حيث يقوم المجمّع الشمسي بامتصاص الإشعاع الشمسي الساقط عليه ومن خلال الماء المار عبر المجمّع الشمسي تنتقل الحرارة من المجمع إلى الماء الذي يسري مباشرة إلى الخزان الحراري، يُسحب الماء الساخن من أعلى الخزان مباشرة حيث يُمرر على مصدر حراري مساعد ليتم تسخينه إلى درجة الحرارة المطلوبة، يتم تعويض الماء المسحوب من الخزان مباشرة من ماء التغذية إلى أسفل الخزان. يمكن تصنيف سخانات الماء الشمسية وفقاً لطريقة جريان الماء في دارة المجمع الشمسي إلى نظام الجريان الحر والذي يعتمد على وضع خزان الماء الساخن فوق المجمع الشمسي (نظام السيفون الحراري)، ونظام الجريان القسري الذي يستخدم مضخة لتدوير الماء بين المجمع الشمسي والخزان [26]كما هو موضح في الشكل(1-15).



الشكل (1-15) مخطط لنظام تسخين مياه شمسي .
(أ)– جريان حر (نظام السيفون الحراري) ، (ب) – جريان قسري .

من الضروري فصل دارة المجمع عن الدارات الأخرى بمبادل حراري وإضافة موانع تجمد في دارة المجمع في المناطق المناخية ذات درجات الحرارة المنخفضة حيث يتجمد الماء، كما يمكن أن يكون المبادل الحراري داخل الخزان أو خارجه، كذلك من الضروري عزل الخزان والأنابيب المتصلة به جيداً.
إن درجة حرارة الماء المطلوبة في السخانات الشمسية المنزلية لا تتعدى الـ 80 درجة مئوية لهذا فإن المجمعات المستوية أو الأنبوبية المفرغة يمكن استخدامها لهذا الغرض.

يمكن حساب الحمل الحراري المطلوب لتسخين الماء إذا افترضنا أن الاستهلاك المنزلي اليومي من الماء الساخن هو 75 ليتراً للشخص الواحد من المعادلة التالية[2] :

$$L_W = N.N_P.75.(T_W - T_m).\rho.C_P \qquad (1\text{-}11)$$

حيث N عدد أيام الشهر
أما N_P عدد الأشخاص المستفيدين من الماء الساخن .
T_W درجة حرارة الماء الساخن المطلوبة (عادةً 60 درجة)
T_m درجة الحرارة الوسطية لماء التغذية المنزلية .
ρ [kg/m^3] كثافة الماء، C_P [kJ/kg.K] الحرارة النوعية للماء.

1-6-2- التدفئة بالطاقة الشمسية :

تستخدم الطاقة الشمسية في تدفئة المباني، يتكون نظام التدفئة الشمسية أساساً من مجمعات شمسية وخزان حراري كبير يسمح بتخزين الفائض من الطاقة الشمسية المجمعة للاستعمال في الأوقات التي تغيب فيها الشمس وفي الليل أو عند تلبد السماء بالغيوم والسحب، بالإضافة إلى عناصر أخرى كالمبادلات الحرارية، ومضخات ومراوح وعناصر وأجهزة تحكم[2].

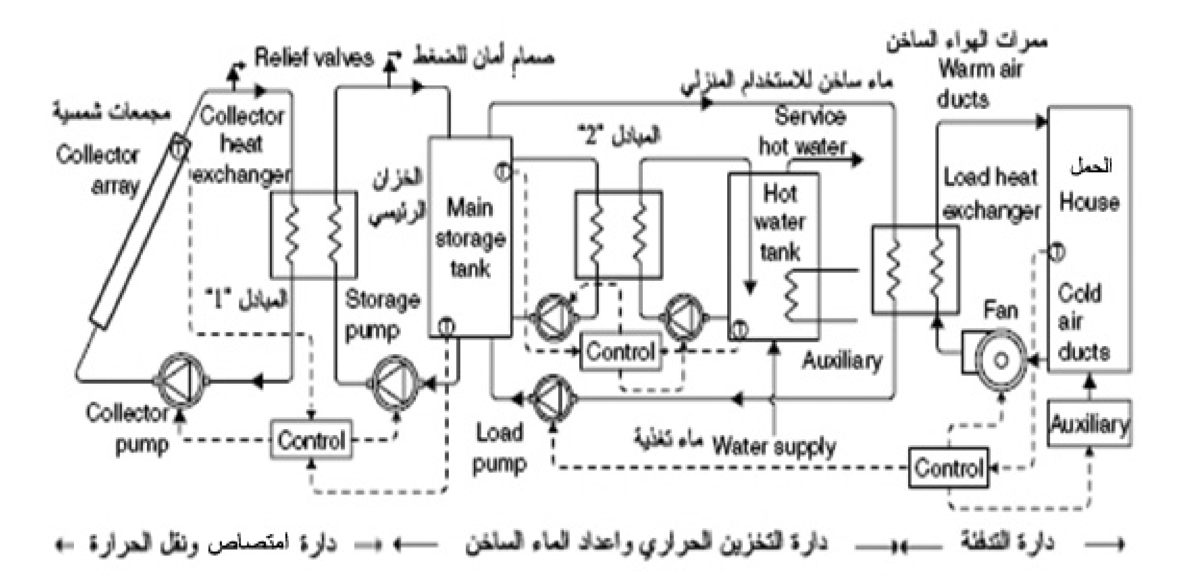
تقسم نظم التدفئة الشمسية الفعالة (active) تبعاً لنوع المائع في دارة المجمع الشمسي إلى نظم سائلة ونظم غازية (هواء).

يوضح الشكل (1-16) أحد النماذج السائلة لتسخين الماء وتدفئة المبنى شمسياً حيث يتكون النظام من الدارات التالية:

1- دارة امتصاص ونقل الحرارة.

2- دارة تخزين الحرارة وتزويد الماء الساخن .

3- دارة التدفئة .



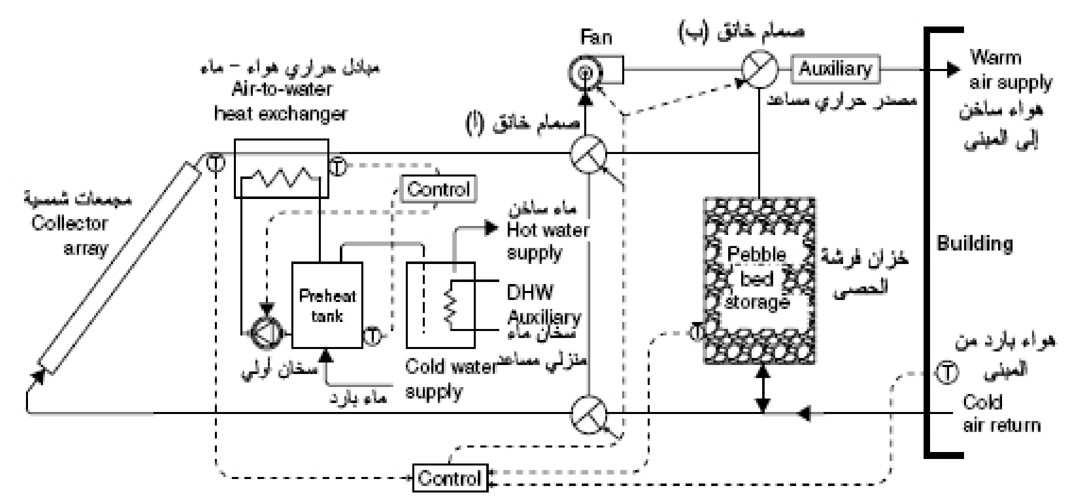
الشكل (1-16) نظام سائل شمسي للتدفئة وتسخين الماء للاستخدامات المنزلية

يمر السائل في المجمع الشمسي في دارة امتصاص ونقل الحرارة، حيث ينقل الحرارة إلى المبادل الحراري "1" ومنه إلى سائل تخزين الحرارة، إن المبادل الحراري يستخدم في حالات انخفاض درجة حرارة الجو شتاءً حيث يضاف إلى المجمع مانع للتجمد، كما يستخدم خزان تمدد، وصمام أمان لحماية الدارة من ارتفاع الضغط الناتج عن التمدد الحراري بالدارة.

في دارة تخزين الحرارة يتوضع الخزان الرئيسي ومضخة تدوير سائل التسخين خلال المبادل (يُستخدم الماء عادة كسائل تسخين)، أما دارة إعداد الماء الساخن فتتكون من مبادل حراري "2" وسخان ماء أولي ومصدر حراري مساعد، في هذه الدارة يدخل الماء البارد إلى سخان الماء الأولي ثُم يخرج منه ليدخل المبادل الحراري "2" فيتم تسخينه ويعود مرةً أخرى إلى السخان الأولي.

ويقوم المصدر الحراري المساعد في تسخين الماء إلى درجة الحرارة المطلوبة، يتم تصميم هذا المصدر المساعد بحيث يكون قادراً على إمداد الماء بالحمل الحراري اللازم لتسخينه أو جزء منه عند الغياب الكامل أو الجزئي للإشعاع الشمسي وعندما يكون الغرض من الدارة التدفئة فقد يتم إلغاء دارة إعداد الماء الساخن، أما دارة التدفئة فإنها تتكون من ممر للهواء المطلوب تسخينه وملف التسخين الرئيسي ومصدر حراري مساعد.

تعمل مضخة الماء الساخن بدارة التدفئة على سحب الماء الساخن من الخزان الرئيسي وتدويره خلال ملف التسخين الرئيسي الموجود في ممر الهواء الساخن ثم إعادته مرةً أخرى إلى الخزان الرئيسي للحرارة. أما المصدر الحراري المساعد فإنه يُستخدم لرفع درجة حرارة الهواء إلى الدرجة المطلوبة إذا لم يتم الوصول إليها عند الخروج من ملف التسخين الرئيسي. يوضح الشكل (1-17) نظام تدفئة بالهواء وتسخين الماء للاستعمال المنزلي بالطاقة الشمسية.



الشكل (1-17) نظام شمسي هوائي للتدفئة وتسخين الماء للاستعمال المنزلي

الهواء هنا هو المائع المستخدم في دارة المجمع الشمسي، ويستخدم مباشرة في التدفئة دون الحاجة لمبادل حراري وسيط.

يمتاز هذا النظام بقدرته على العمل في الأماكن التي يُخشى فيها من التجمد دون الحاجة لإضافة مانع للتجمد، ونظراً لاستخدام نظام المواد الصلبة (الحصى) في التخزين فإن الخزان الحراري يتألف من طبقات حرارية.

درجة الحرارة الطبقة العليا أعلى من درجة الحرارة الطبقة السفلى ، إن التدرج الحراري في الخزان يعني أن درجة حرارة الهواء الخارج من أسفل الخزان والداخل إلى المجمع الشمسي يكون أقل نسبياً من درجة الحرارة المناظرة للسائل مما يحسّن من الكفاءة الحرارية للمجمع الشمسي.

على الرغم من المزايا الإيجابية لهذا النظام مقارنةً بالنظام السائل فإن الطاقة اللازمة لتدوير الهواء مقارنة بالطاقة اللازمة لتدوير الماء أكبر بكثير من أجل الاستطاعة الحرارية نفسها، كذلك انخفاض السعة الحرارية للهواء مقارنة بالماء، إضافة للحجم الكبير للخزان الحراري في نظام الهواء.ويحوي النظام ثلاث دارات:

- دارة تجميع الطاقة الشمسية وتدفئة المبنى.
- دارة تجميع الطاقة الشمسية وتخزينها في طبقات الحصى.
- دارة استخدام الخزان الحراري و/أو المصدر الحراري المساعد لتدفئة المبنى.

الحالة الأولى: تُستخدم الطاقة الشمسية المجمعة في تدفئة المبنى مباشرة حيث يتم سريان الهواء العائد من المبنى خلال المجمع ثم المبادل الحراري ثم المروحة ثم المصدر الحراري المساعد فالمبنى، حيث يستخدم المصدر الحراري المساعد ليُكمل حمل التدفئة للمبنى إذا لم تكفِ الطاقة الشمسية لتحقيق ذلك.

الحالة الثانية: المبنى لا يحتاج إلى تدفئة بينما يمكن استغلال الطاقة الشمسية، عندها يتدفق الهواء الخارج من المجمع إلى المبادل الحراري ثم المروحة ثم الخزان الحراري الصخري ثم يعود الهواء من أسفل الخزان إلى المجمع مرةً أخرى.

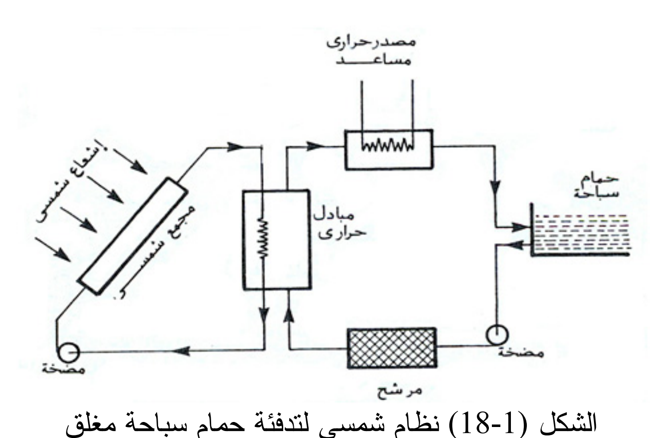
الحالة الثالثة: غياب الطاقة الشمسية مع حاجة المبنى للتدفئة، عندها يدخل الهواء العائد من المبنى من أسفل الخزان الحراري ثم يخرج الهواء من أعلى الخزان إلى المصدر الحراري المساعد ثم المبنى.

أما دارة تسخين الماء المنزلي فإنها تتكون من مضخة وسخان أولي مساعد ومصدر حراري مساعد.

من الملاحظ أن أنظمة التدفئة الشمسية السائلة أو الغازية (الهواء) تستخدم مصدراً حرارياً مساعداً لإمداد المبنى بالجزء الباقي من حمل التدفئة وبالتالي فإن أي نظام تدفئة شمسي يحتاج إلى دراسة للجدوى الاقتصادية وحساب المساحات المثلى للمجمعات الشمسية بحيث تعطي نظاماً اقتصادياً وملبياً للأحمال المطلوبة.

1-6-3- التسخين الشمسي لحمامات السباحة:

يشكّل النظام الموّضح بالشكل(1-18) نظاماً شمسياً لتدفئة حمام سباحة مغلق، يتكون من دارتين: دارة ماء المجمع الشمسي، يكون فيها الماء مختلطاً بمانع ٍ للتجمد و دارة ماء حمام السباحة.



الشكل (1-18) نظام شمسي لتدفئة حمام سباحة مغلق

يُسحب ماء حمام السباحة من قرب القاع حيث يتم ترشيحه ثم يمرر إلى مصدر حراري مساعد لتسخينه إلى درجة الحرارة المطلوبة قبل أن يضاف إلى ماء حوض السباحة.

من الاستخدامات الأخرى للطاقة الشمسية والمجمعات الحرارية الشمسية نذكر أيضاً:

1- تنقية المياه المالحة.

2- توليد الطاقة الكهربائية عبر مولد بخار شمسي أو عبر أبراج استقبال مركزية أو عبر البرك الشمسية (*Ponds*).

3- التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية.

4- **التبريد بالطاقة الشمسية،** الذي سنشرحه بالتفصيل في فصلٍ لاحق.

الفصل الثاني – دارات التبريد الامتصاصية الشمسية

2-1- مقدمة:

شهدت فترة السبعينيات وحتى وقتنا الحاضر انتشارَ أبحاثِ الطاقة الشمسية وتطبيقاتها في معظم دول العالم ومن ضمنها الدول العربية وقد توسعت استخدامات الطاقة الشمسية لتشمل العديد من المجالات ومنها أغراض التبريد والتكييف.

تبرز اليوم أهمية الاستفادة من الطاقة الشمسية في تأمين احتياجات التبريد والتكييف من خلال تخفيف الزيادة الحادة في الطلب على الطاقة الكهربائية وخاصةً في الأوقات والأماكن التي يزداد فيها الإشعاع الشمسي وتزداد معها احتياجات التبريد والتكييف، وأيضاً في الحدّ من انتشار الغازات والمواد الملوّثة للبيئة حيث أن دارات التبريد الانضغاطية التقليدية تستهلك الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الضاغط وتستخدم أحد المركبات الهيدروكلورفلوركربونية (الفريونات) كوسيط عامل في الدارة وهي من المواد الملوثة.

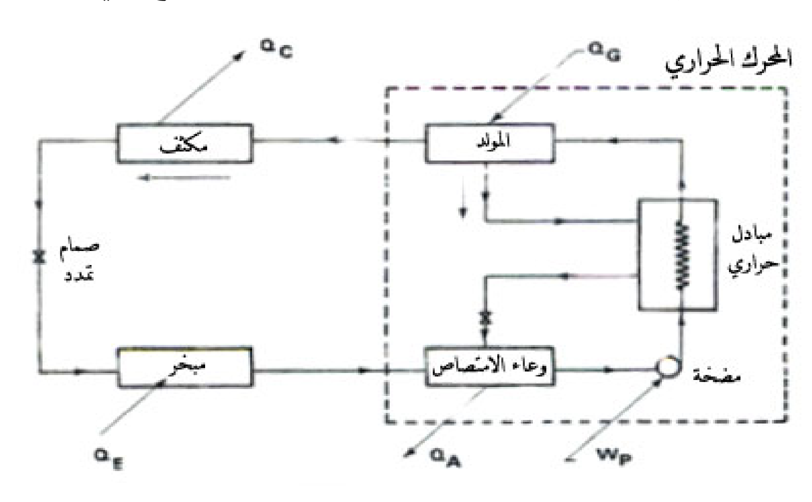
يُمكن من حيث المبدأ تحويل الطاقة الحرارية الشمسية إلى طاقة كهربائية ثم تغذيتها إلى آلة تبريد أو تكييف تُؤمن التأثير التبريدي المطلوب، إلا أن هذه الطريقة لاستخدام الطاقة الشمسية في التبريد والتكييف غير مجدية، مما دعا الباحثين إلى ضرورة إيجاد طرق أخرى لاستخدام الطاقة الحرارية الشمسية مباشرة وتم الانتباه إلى الدارة الامتصاصية التي تعمل أساساً على الطاقة الحرارية ولا تحتاج إلا إلى قدرٍ ضئيل من الطاقة الكهربائية أو الميكانيكية [2].

إن تطوّر الأبحاث والبرامج في مجال التخزين الحراري والمجمّعات الشمسية والوصول إلى مجمعات ذات سطوح انتقائية عالية الأداء تؤمن درجات حرارة عالية وكافية لتشغيل دارة التبريد الامتصاصية قد شجّع الباحثين على مواجهة الصعوبات التي نشأت لدى تشغيل دارة التبريد الامتصاصية بالطاقة الشمسية مثل كيفية التشغيل أثناء الليل أو عند تلبد السماء بالغيوم وعدم توفر الإشعاع الشمسي الكافي، كما شجعهم ذلك على مواجهة التحديات المتعلقة بتحسين معامل الأداء الكلي للنظام وتخفيض الكلفة الاقتصادية لهذا النوع من الأنظمة [3].

على الرغم من أن معظم الأبحاث في مجال التبريد بالطاقة الشمسية قد تركزت على تطوير الدارة الامتصاصية فإن بعض الأبحاث اتجهت نحو استخدامات أخرى مثل استخدام الطاقة الشمسية في التبريد المتقطع بالامتزاز أو استخدامها في عمليات التجفيف والترطيب.

2-2- دارة التبريد الامتصاصية الأساسية:

إن مبدأ عمل الدارة الامتصاصية مشابه لدارة انضغاط البخار من حيث تبخير وسيط التبريد عند ضغط منخفض لتأمين التأثير التبريدي المطلوب ومن ثم تكثيفه عند ضغط مرتفع لطرد الحرارة من وسيط التبريد، أما الاختلاف الرئيسي فإنه يكمن في كيفية الحصول على الضغط المرتفع في المكثف، ففي دارة انضغاط البخار يقوم الضاغط بهذه المهمة أما في الدارة الامتصاصية فإنه يتم استبدال الضاغط الميكانيكي للدارة الانضغاطية بثلاثة عناصر هي المولد ووعاء الامتصاص والمضخة الميكانيكية ويضاف إلى هذه الوحدات مبادل حراري لتحسين أداء الدارة [2,36] كما هو موضح في الشكل (1-2):



الشكل (1-2) دارة التبريد الامتصاصية الأساسية

تستخدم الدارة الامتصاصية محلولاً متجانساً من مادتين، يتم حرارياً فصل إحداهما من المحلول بصورة جزئية على شكل بخار يعمل كوسيط تبريد بالدارة.

تعمل المضخة على رفع ضغط المحلول من الضغط المنخفض (ضغط المبخر ووعاء الامتصاص) إلى الضغط المرتفع (ضغط المكثف والمولد) بحيث تعمل الدارة الامتصاصية عند ضغطين مختلفين.

تقوم الطاقة الحرارية المقدمة إلى المولد بتبخير وسيط التبريد من المحلول حيث يمر بخار وسيط التبريد في المكثف ليتكاثف ومن ثم يمر في صمام التمدد حيث ينخفض ضغطه. يعود المحلول قليل التركيز من وسيط التبريد (المحلول الغني) إلى وعاء الامتصاص ليلاقي بخار وسيط التبريد القادم من المبخر عند ضغط منخفض ويقوم بامتصاصه حيث ينتج عن عملية الامتصاص حرارة وبالتالي إذا لم يتم طرح هذه الحرارة بصورة مستمرة إلى الوسط الخارجي فإنّ درجة حرارة المحلول سترتفع وستتوقف عندها عملية امتصاص البخار، الأمر الذي يتطلب تبريد وعاء الامتصاص باستمرار.

إنّ الجزء المتحرك في الدارة الامتصاصية هو المضخة فقط بينما يكون الضاغط في دارة انضغاط البخار، وهذا ما يجعل الدارة الامتصاصية أكثر هدوءاً وأقل استهلاكاً للطاقة الكهربائية من الدارة الانضغاطية حيث أن العمل اللازم لرفع ضغط السوائل أقل بكثير من العمل اللازم لرفع ضغط الغازات من أجل نفس قيمتي الضغط.

يمكن تلخيص الفروق الأساسية بين الدارة الانضغاطية والدارة الامتصاصية بالنقاط التالية :[3]

1- تحوي الدارة الانضغاطية على مائع واحد وهو وسيط التبريد في حين أن الدارة الامتصاصية تحوي مزيج من مائعين (وسيط التبريد و المادة الماصة).

2- تتألف المجموعة الانضغاطية من دارة واحدة ولكن المجموعة الامتصاصية تتألف من دارتين دارة التبريد الرئيسية التي يجري فيها وسيط التبريد فقط ودارة القدرة التي يجري فيها المحلول المؤلف من المادة الماصة ووسيط التبريد.

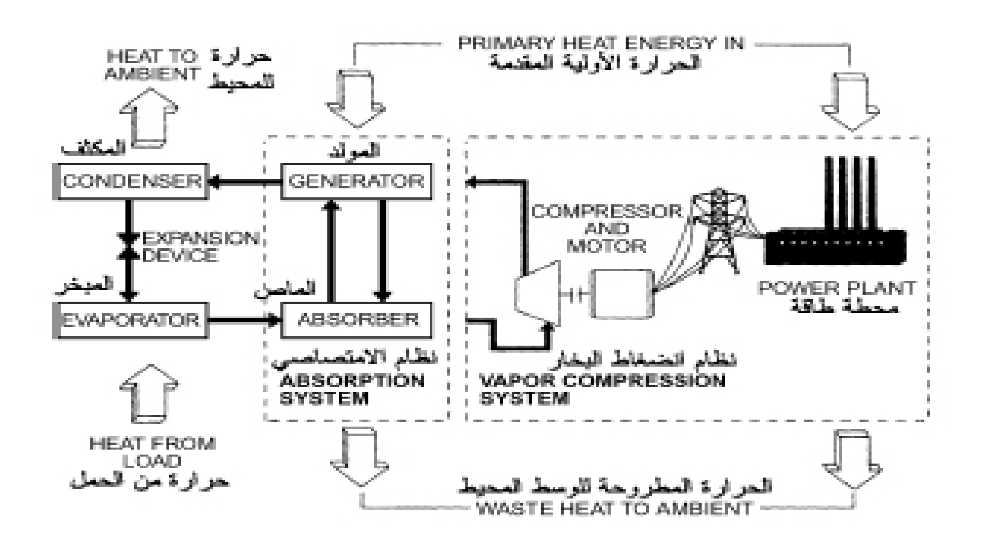
3- يتم رفع ضغط بخار وسيط التبريد في دارة التبريد الانضغاطية باستخدام ضاغط ميكانيكي في حين أنه في الدارة الامتصاصية يتم رفع ضغط وسيط التبريد وهو في الحالة السائلة بوساطة ما يعرف بالمحرك الحراري.

4- في الدارة الامتصاصية يحدث تغير في الطور لوسيط التبريد فقط أما المادة الماصة فتبقى في الحالة السائلة وتقتصر دارتها ضمن المحرك الحراري.

إنّ قيمة عمل المضخة ضئيل مقارنة بكمية الحرارة المضافة إلى المولد وبالتالي فإن معامل الأداء لدارة التبريد الامتصاصية يمثل نسبة حمل التبريد (معدل الحرارة المسحوبة من المبخر) إلى معدل الحرارة المضافة إلى المولد[2].

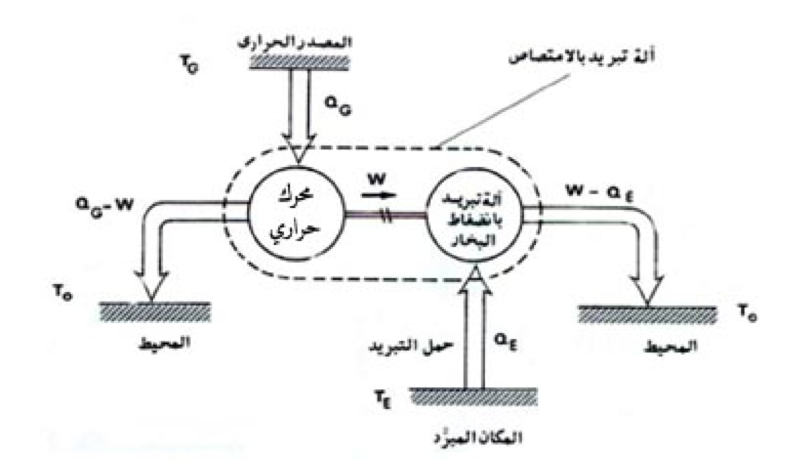
$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \tag{2-1}$$

إن قيمة معامل أداء الدارة الامتصاصية COP أقل من تلك التي في الدارة الانضغاطية (0.8 مقابل 3.5 على سبيل المثال)، ولكن من غير الملائم المقارنة بين معاملي الأداء للدارتين لأن شكل الطاقة المُقدم مختلف بين الدارتين حيث تُقدّم طاقة كهربائية للدارة الانضغاطية بينما تُقدم طاقة حرارية للدارة الامتصاصية ومن المعلوم أن الطاقة الكهربائية تزيد وبشكل كبير من حيث القيمة والتكلفة مقارنة بالطاقة الحرارية [36]، يوضح الشكل (2-2) شكل الطاقة المقدم لكلا النظامين.



الشكل (2-2) التشابه بين النظام الامتصاصي ونظام انضغاط البخار

إذا استبدلنا بالدارة الامتصاصية دارتين إحداهما لتوليد الطاقة الكهربائية وأخرى دارة تبريد انضغاطية كما هو موضح في الشكل(2-3) فإنه من الممكن استنتاج العلاقة التي تعطي أقصى معامل أداء ممكن للدارة الامتصاصية.



الشكل (2-3) التكافؤ بين الدارة الامتصاصية ودارة توليد قدرة مع دارة تبريد انضغاطية

إن المعادلة السابقة يمكن كتابتها بالشكل:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{W} \times \frac{W}{\dot{Q}_g} \qquad (2\text{-}2)$$

$$COP = (COP)_{com} \times \eta_{th} \qquad (2\text{-}3)$$

حيث: $(COP)_{com}$ معامل الأداء لدارة التبريد الانضغاطية.

η_{th} المردود الحراري لدارة توليد الطاقة الميكانيكية اللازمة لتشغيل دارة التبريد الانضغاطية.

أما معامل الأداء لدارة التبريد الامتصاصية المثالية فمن الممكن كتابتها بالمعادلة:

$$COP_{Ideal} = COP_{RC} \times \eta_c \qquad (2\text{-}4)$$

حيث COP_{RC} معامل الأداء الحراري لدارة كارنو العكوسة للتبريد.

η_c المردود الحراري لدارة كارنو.

بإعادة كتابة المعادلة السابقة تصبح :

$$COP_{Ideal} = \left(\frac{T_e}{T_O - T_e}\right) \times \left(\frac{T_g - T_O}{T_g}\right) = \frac{T_e}{T_g} \times \frac{T_g - T_o}{T_o - T_e} \qquad (2\text{-}5)$$

حيث $\boldsymbol{T}$ يرمز لدرجة الحرارة المطلقة بينما يرمز الدليل $\boldsymbol{g}$ إلى المولد والدليل $\boldsymbol{e}$ للمبخر والدليل $\boldsymbol{o}$ للجو المحيط.

لا يوجد مادة تبريد مثالية تحقق كل المتطلبات الكيميائية والفيزيائية والفيزيولوجية، لهذا يراعى عند اختيار وسيط التبريد المتطلبات الأساسية.

تتلخص المتطلبات الأساسية لمادة التبريد بالنقاط التالية:

- الاستقرار: يجب أن تكون مواد التبريد مستقرة كيميائياً في كامل مجال درجة الحرارة والضغط، بحيث لا يسمح بتفكك مواد التبريد.
- عدم الفعالية الكيميائية: يجب على مواد التبريد أن تكون حيادية قدر الإمكان أي غير قادرة على التفاعل الكيميائي مع مواد مركبات الآلة الامتصاصية.
- الاحتراق وأخطار الانفجار: لا يسمح لمواد التبريد أن تكون قابلة للاحتراق ولا يسمح بتشكيل أي خلائط انفجارية مع الهواء.
- الضغوط: من المفترض ألا تكون ضغوط البخار في عمليات آلات التبريد الامتصاصية مرتفعة كثيراً أو منخفضة كثيراً، إذ تتطلب الضغوط المرتفعة آلات ذات جدران سميكة ويزداد خطر تسرب مادة التبريد. كما أنه من المفروض أن تكون درجة الحرارة الحرجة لمادة التبريد عالية بشكلٍ كافٍ ودرجة حرارة التجمد منخفضة بشكلٍ كافٍ.
- اللزوجة: ينبغي أن تكون قيمة اللزوجة الديناميكية منخفضة بالحالة السائلة والغازية لأن هذا يقلل من ضياع الضغط لدى الجريان في الأنابيب والصمامات.

- الناقلية الحرارية: كلما كانت الناقلية الحرارية لسائل مادة التبريد كبيرة تحسنت عملية النقل الحراري عند التبخر والتكثف لمادة التبريد.
- حرارة التبخر والسعة الحرارية النوعية: إن حرارة تبخر عالية لمادة التبريد تكون مرغوبة عندما تكون السعة الحرارية النوعية لمادة التبريد عالية في الحالة السائلة.
- السمومية: يجب ألا تكون مواد التبريد سامة ، وينبغي أن تكون رائحتها ملحوظة من أجل التعرف عليها في حالات التسرب القليلة . كما يجب أن لا يكون لهذه المواد تأثير ضار على المواد المراد تبريدها.

يجب أن تحقق كلتا المادتين (المادة الماصة ومادة التبريد) في الدارة الامتصاصية المتطلبات التالية:

- يجب ان تكون مادة التبريد قابلة للامتصاص عند درجات حرارة تبريد منخفضة نسبياً من (20–40) درجة مئوية في المادة الماصة وتكون فرق درجة حرارة الغليان لهما عند ضغط ثابت كبير قدر الإمكان.

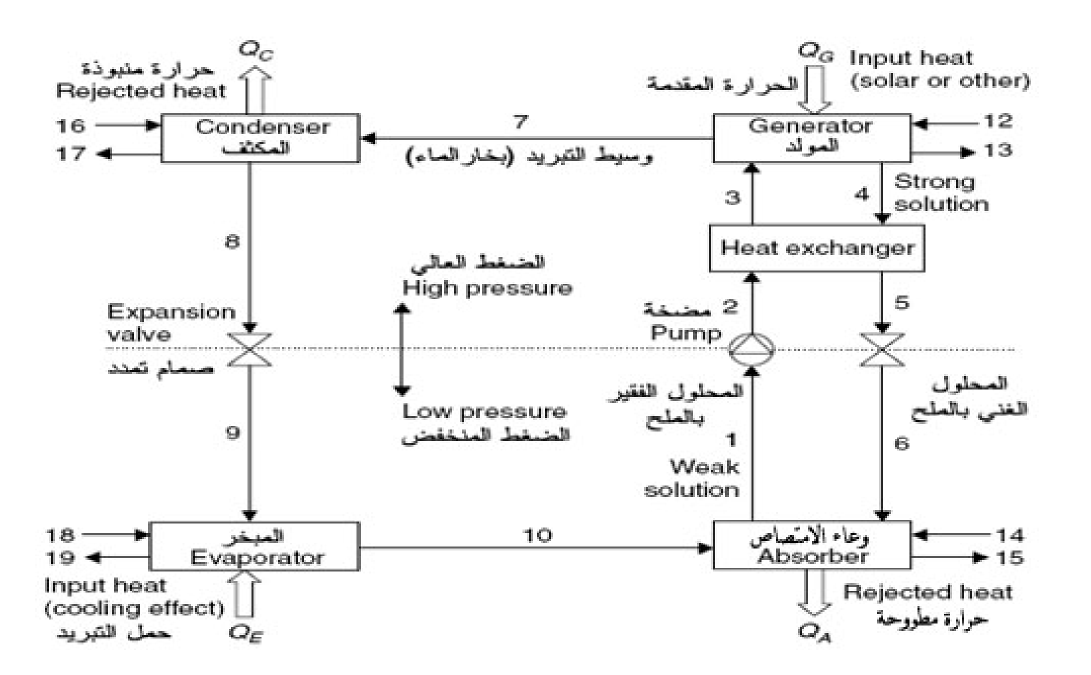
يوضح الجدول التالي عدة محاليل من مائع التبريد والمادة والمادة الماصة التي وجد أنها تحقق عدداً كبيراً من الخواص آنفة الذكر. إلا أنه عملياً تنحصر استخدامات دارات التبريد بالامتصاص على محاليل الماء– بروميد الليثيوم و الأمونيا–ماء نظراً لتفوق هذين المحلولين على باقي المحاليل المذكورة بالجدول (2-1).

الجدول (2-1) بعض المحاليل الثنائية المستخدمة في دارات التبريد الامتصاصية

مائع التبريد	المادة وعاء الامتصاصة	الرمز الكيميائي
ماء	بروميد الليثيوم	H_2o-LiBr
أمونيا	ماء	NH_3- H_2o
أمونيا	ثيوسينات الصوديوم	NH_3-NaSCN
أمونيا	نترات الليثيوم	NH_3-$LiNo_3$
أمونيا	كلوريد الكالسيوم	NH_3-$CaCl_2$

2-3- دارة التبريد الامتصاصية التي تستخدم محلول بروميد الليثيوم – ماء :

يوضح الشكل(2-4) مخطط دارة دارة التبريد الامتصاصية حيث يضاف إلى أجزاء الدارة الأساسية مبادل حراري يُحّسن من أداء الدارة.

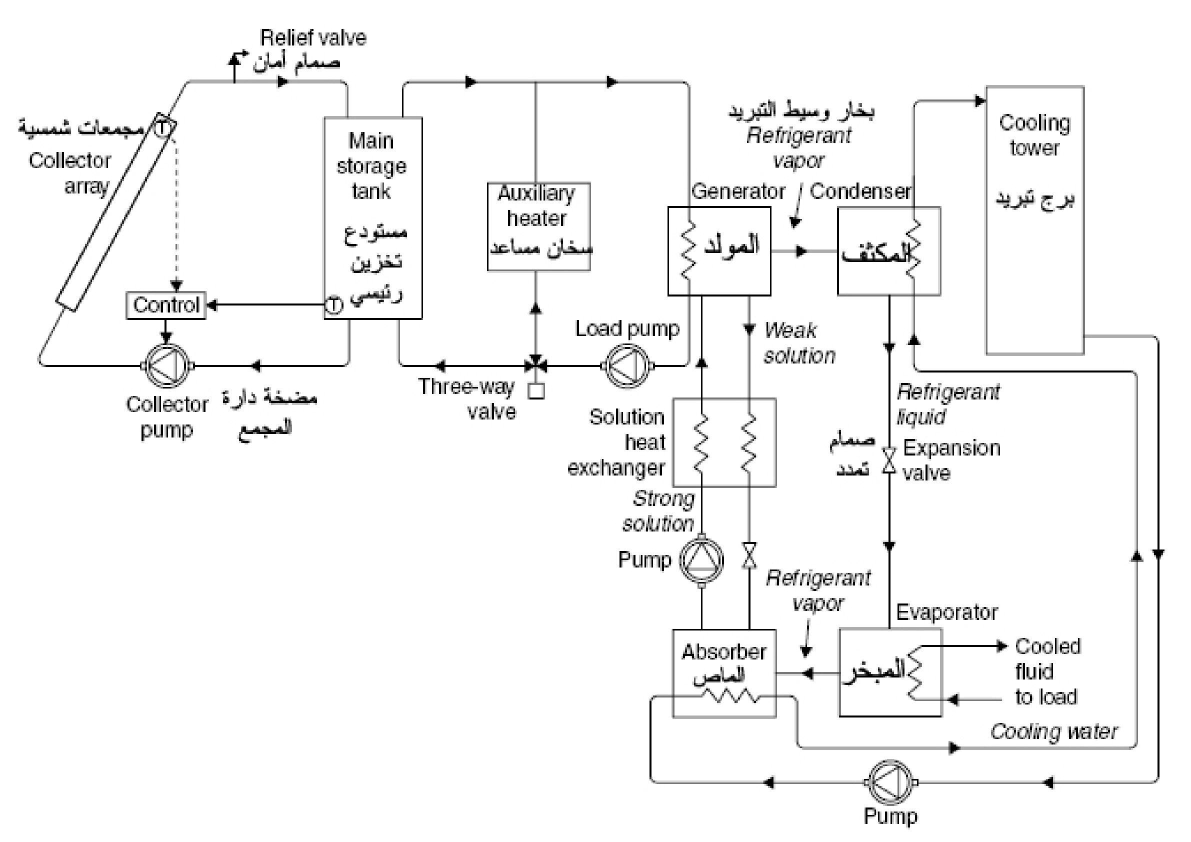


الشكل (2–4) دارة التبريد الامتصاصية تستخدم بروميد الليثيوم –ماء وبمرحلة واحدة

يُستخدم بروميد الليثيوم كمادة ماصة حيث يمتاز بمقدرته الكبيرة على امتصاص الماء عند درجات حرارة منخفضة أما وسيط التبريد فهو الماء. يُستخدم عادةً ماء تبريد وعاء الامتصاص في تبريد المكثف ثم يعاد تبريده بواسطة برج تبريد قبل أن يعود مرةً أخرى إلى وعاء الامتصاص[2].

يوضح الشكل (2-5) نظام تبريد امتصاصي شمسي يستخدم بروميد الليثيوم–ماء كزوج عامل ويتم تغذية المولد بماء ساخن مستمدة من مجمعات شمسية مع نظام تخزين وتسخين مساعد.

تعاني هذه الدارة من احتمال تصلب جزيئات ملح بروميد الليثيوم في وعاء الامتصاص، تدعى هذه الظاهرة بالتبلور وتحدث نتيجة زيادة تركيز بروميد الليثيوم في المحلول فوق الحد المسموح، حيث مع تناقص درجة حرارة المحلول نبتعد عن الحد المسموح به لتركيز بروميد الليثيوم لهذا تحدث عملية التبلور عادة عند مدخل وعاء الامتصاص حيث يكون تركيز بروميد الليثيوم عالياً ودرجة الحرارة منخفضة، يتم عادة التغلب على هذه الظاهرة من خلال تزويد أنابيب الدارة بنظام تسخين أوتوماتيكي يعمل فور حدوث التبلور مع ضرورة أخذ الاحتياطات اللازمة لمنع تسرب الهواء إلى داخل الأنابيب[3].



الشكل (3-5) يوضح نظام تبريد امتصاصي شمسي

تستخدم عملياً مخططات تحدد العلاقة بين المتغيرات التصميمية لدارة بروميد الليثيوم–ماء [الملحق– ب–]، حيث من خلال المخطط(ب–2) تتحدد العلاقة بين درجة الحرارة للمحلول المشبع عند التوازن الترموديناميكي (أي عند درجة الحرارة التي يبدأ عندها تبخر الماء من المحلول) مع تركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند قيم مختلفة للضغط، أما المخطط (ب–1) فإنه يحدد العلاقة بين إنتالبي المحلول المشبع وتركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند درجات حرارة مختلفة.

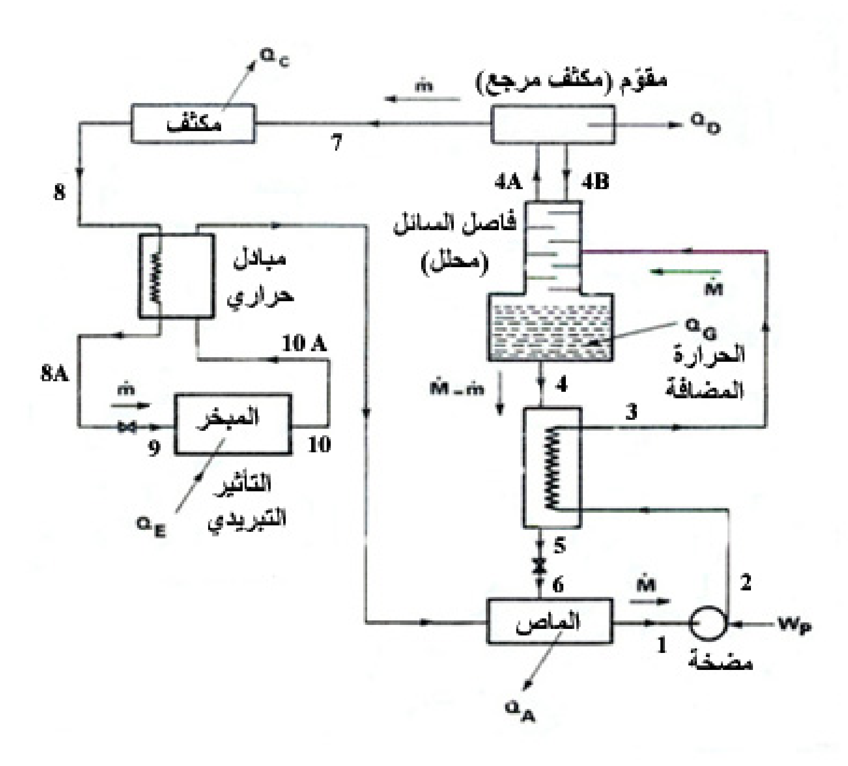
2-4- دارة التبريد الامتصاصية التي تستخدم محلول (الامونيا –ماء) :

في دارة التبريد التي تستخدم المحلول الأمونيا –ماء يُستخدم الماء كمادة ماصة بينما الأمونيا كوسيط التبريد، من الممكن في هذه الدارة ومع هذا المزيج تخفيض درجة حرارة المبخر إلى أقل من الصفر المئوي، إن هذه الإمكانية لم يكن من الممكن تأمينها باستخدام دارة بروميد الليثيوم– ماء كون الماء هو وسيط التبريد[1].

إن محلول الأمونيا–ماء يُحقق شروط المحلول الثنائي التي سبق ذكرها ماعدا كلاً من شرط الأمان حيث أن الأمونيا مادة سامة لهذا يُحظر استخدام دارات التبريد الامتصاصية

التي تستخدم محلول (الأمونيا –ماء) في الأماكن المغلقة، وشرط الفرق الكبير في درجة حرارة الغليان عند ضغط ثابت.

يوضح الشكل (2-6) مخطط دارة الأمونيا –ماء، ويلاحظ أن بخار الأمونيا المتولد نتيجة إضافة الحرارة في المولد الحراري يحمل معه نسبة من بخار الماء، لهذا يوضع فوق المولد الحراري محلل Analyzer أو فاصل لقطرات الماء و الأمونيا، أما بخار الماء المحمول مع بخار الأمونيا فيتم تكثيفه في مكثف مرجع أو مكرر Rectifier من خلال تبريد البخار الناتج من المولد إلى درجة حرارة أخفض قليلاً من درجة غليان الماء عند ضغط المكثف. ويسمح المكرر في العادة بخروج بخار الماء و الأمونيا بتحميص قدره حوالي 4˚C ويُفضل عادة استخدام مبادل حراري بين سائل الأمونيا العائد من المكثف و بخار الأمونيا الحار الخارج من المبخر وذلك لتحسين التأثير التبريدي للمبخر وبالتالي تحسين معامل الأداء للدارة.



الشكل (2-6) رسم تخطيطي لدارة تبريد امتصاصية باستخدام محلول الأمونيا – ماء

تستهلك دارات التبريد الامتصاصية عموماً الطاقة الحرارية بشكلٍ مباشر وتحتاج في الوقت نفسه إلى مضخة كهربائية ذات استطاعة صغيرة لضخ المحلول الثنائي من الوعاء وعاء الامتصاص إلى المولد، لقد تم تشغيل بعض أنواع الدارات الامتصاصية التي تعتمد على مبدأ التبريد بالانتشار لتعمل دون الحاجة إلى أي مضخة كهربائية حيث يقوم المولد

بدور مضخة تخلخل ويستخدم غاز خامل مساعد (الهليوم–الهيدروجين) في تحقيق توازن الضغط بين المولد والمبخر[3].

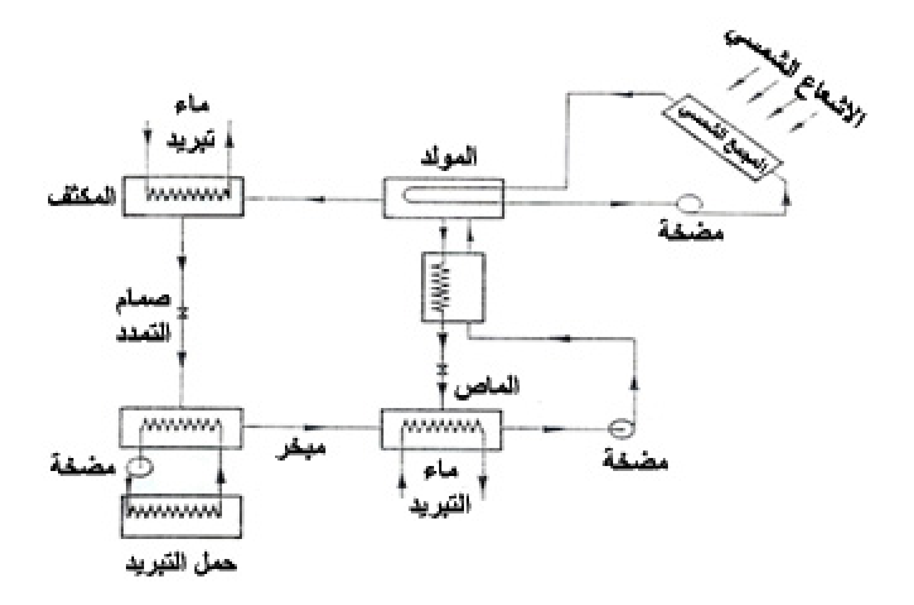
بإجراء مقارنة بين دارة التبريد الامتصاصية التي تستخدم بروميد الليثيوم– ماء ودارة التبريد الامتصاصية التي تستخدم الأمونيا– ماء نجد النقاط التالية:

1. تعتبر دارة بروميد الليثيوم –ماء أسهل نسبياً من دارة الأمونيا –ماء من حيث أنها لا تحتاج إلى محلل (فاصل سائل) أو مكثف مرجع (مكرر).
2. معامل الأداء لدارة بروميد الليثيوم يكون أفضل منه في حالة دارة الأمونيا ماء وذلك عند استخدام نفس درجة الحرارة للمولد الحراري وظروف التشغيل الأخرى.
3. عند العمل عند نفس الظروف فإن دارة الأمونيا –ماء تعطي قيماً أخفض لدرجة حرارة المبخر من القيم التي تعطيها دارة الليثيوم.
4. تمتاز دارة الماء بروميد الليثيوم بانخفاض نسبة الضغوط خلال المضخة مقارنةً بدارة محلول الأمونيا –ماء مما يعني انخفاض قيمة عمل المضخة.
5. يجب اتخاذ الاحتياطات في دارة الماء بروميد الليثيوم لتجنب حدوث التبلور عند الدخول إلى وعاء الامتصاص عند ارتفاع تركيز الملح (بروميد الليثيوم) في المحلول فوق حد التبلور.
6. يجب اتخاذ الاحتياطات في دارة الأمونيا –ماء وخاصة في المباني السكنية نظراً للمخاطر التي تنشأ عند حدوث تسرب لغاز الأمونيا من الدارة.

2-5- تشغيل دارة التبريد الامتصاصية بالطاقة الشمسية ومراحل تطويرها:

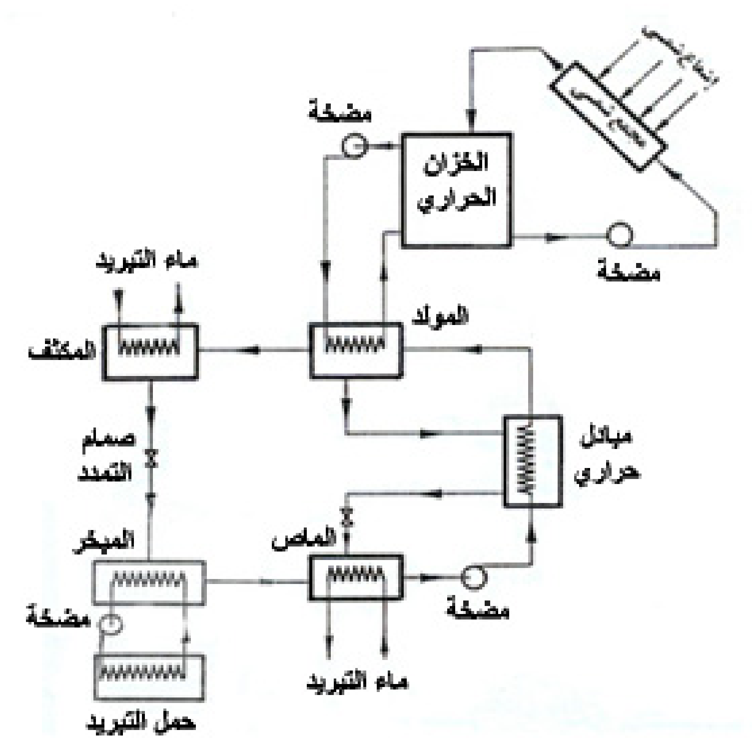
تختلف أنظمة التبريد الامتصاصية الشمسية فيما بينها تبعاً للمواصفات المطلوبة في كل تطبيق على حدة، حيث أهم مكونات هذه الأنظمة هي المجمعات الشمسية وآلة التبريد الامتصاصية أما باقي عناصر النظام ومكوناته فإنها تختلف بالعادة من نظامٍ لآخر[2].

يوضح الشكل(2-7) استخدام المجمّعات الشمسية لتغذية دارة تبريد امتصاصية بالطاقة الحرارية عبر مائع نقل الحرارة من المجمّع الشمسي إلى المولد(الذي عادةً يكون الماء نظراً لرخص ثمنه ولارتفاع حرارته النوعية).



الشكل (2-7) تشغيل شمسي مباشر لدارة تبريد امتصاصية

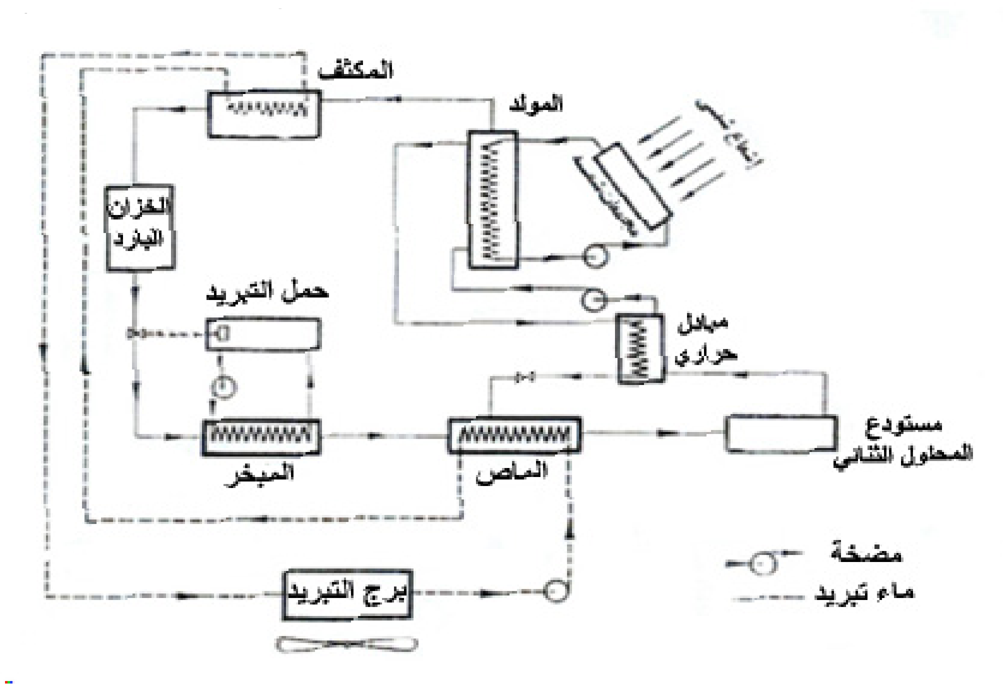
يبدو هذا النظام غير مناسبٍ للاستخدام المستمر لفترات طويلة لأن عمله مرهون بوجود مصدرٍ كافٍ من الإشعاع الشمسي، وبالتالي من غير الممكن تشغيله ليلاً وفي الأيام التي تتزايد فيها السحب في السماء. يمكن تعديل النظام باستخدام خزان حراري لتخزين الماء الساخن عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً. في الشكل (2-8) يتم تخزين الماء الساخن القادم من المجمعات في مستودع لاستخدامه فيما بعد وتسخين المولد لفترات أطول وبالتالي تتحدد مساحة المجمعات الشمسية المستخدمة وحجم مستودع التخزين بدلالة مقدار الإشعاع الشمسي المتاح يومياً وحمل التبريد المطلوب تأمينه وعدد ساعات العمل.



الشكل (2-8) تشغيل شمسي لدارة تبريد امتصاصية مع نظام تخزين للماء الساخن

هناك عدة بدائل للتخزين البارد، يوضح الشكل(2-9) نظاماً يستخدم مستودعان أحدهما لتخزين مائع التبريد والأخر لتخزين المحلول الثنائي المستخدم في آلة التبريد حيث يمتاز هذا النظام بارتفاع مقدار الطاقة المخزنة في وحدة الحجم من المستودع حيث يتم تخزين الطاقة هنا على شكل طاقة كامنة بينما يتم تخزينها على شكل طاقة محسوسة فيما سبق.

يوضع مستودع تخزين المحلول الثنائي عند الخروج من وعاء الامتصاص وقبل الدخول إلى المبادل الحراري أما مائع التبريد فيوضع بعد المكثف مباشرة.



الشكل (2-9) تشغيل شمسي لنظام تبريد امتصاصي يحوي مستودعاً لوسيط التبريد و آخر للمحلول الثنائي

إذاً توجد العديد من النظم المقترحة للتشغيل الشمسي لدارات التبريد الامتصاصية، ولهذا من المهم وجود معايير لمقارنة هذه النظم وتقويمها بالنسبة لبعضها البعض، من أهم هذه المعايير النسبة الحرارية للنظام والمساحة النوعية للمجمع الشمسي، يُقصد بالنسبة الحرارية للنظام النسبة بين حمل التبريد بالمبخر $\dot{Q}_e$ ومقدار الإشعاع الشمسي الساقط على المجمعات الشمسية للنظام أي:

$$STR = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{H}_s} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \times \frac{\dot{Q}_g}{\dot{H}_s} = COP \times \eta_{Coll} \qquad (2\text{-}6)$$

حيث η_{Coll} المردود الحراري للمجمّع الشمسي، COP معامل الأداء.

إن النسبة الحرارية الحقيقية تعبر عن مقياس لمدى كفاءة أداء النظام بغض النظر عن تكلفته الأولية، لهذا وجد المقياس الثاني وهو المساحة النوعية للمجمعات الشمسية الذي يمثل مساحة المجمع الشمسي اللازم استخدامه لنظام تبريد ما لإنتاج وحدة التبريد خلال تشغيل هذا النظام لمدة يوم، بالتالي فإن تكلفة النظام المستخدم تتناسب طرداً مع تكلفة المجمعات الشمسية المستخدمة في النظام. أو من الممكن الاستفادة من نسبة مساهمة الطاقة الشمسية والممثلة بنسبة التغطية الشمسية.

$$F = \frac{\dot{Q}_g - \dot{Q}_{Aux}}{\dot{Q}_g} \qquad (2\text{-}7)$$

تصنف وحدات التبريد الامتصاصية أيضاً حسب مصدر الطاقة الحرارية المغذي[5]:

1- وحدات التغذية المباشرة بالحرارة وهي وحدات تحتوي على حرّاق لحرق الوقود الذي قد يكون غازاً طبيعياً، بروبان، نفطاً أو قطراناً خفيفاً.

2- وحدات تغذية غير مباشرة حيث تستخدم البخار أو المائع الحراري الصادر عن مصدر خارجي لتغذي به الدارة .

3- وحدات استرجاع الحرارة أو الغازات العادمة وهي آلات مصممة خصيصاً تُربط مباشرة بمصدر حرارة مهدورة كالحرارة الناتجة عن محطات توليد الطاقة.

2-6- استخدام دارتين متتاليتين للتبريد الشمسي:

إن أكثر المحاليل الثنائية المستخدمة عند تشغيل دارة التبريد الامتصاصية بالطاقة الشمسية هما محلول بروميد الليثيوم–ماء ومحلول الأمونيا– ماء، لكن المحلول الأول يمتاز عن المحلول الثاني في عدة نقاط أهمها الارتفاع النسبي في معامل أداء دارة التبريد والأمان التشغيلي في الأماكن المأهولة بالناس. ولقد لوحظ عند تشغيل دارة الامتصاص باستخدام محلول الماء وبروميد الليثيوم توقف الدارة عن العمل كلياً إذا ما ارتفعت درجة حرارة الجو المحيط عن الحد المسموح به، حيث يبدأ بخار الماء بالتواجد في خط السحب للمضخة، ويرتفع الحد المسموح لدرجة حرارة الجو المحيط بارتفاع درجة حرارة المبخر[1]. بالتالي من أجل إمكانية التشغيل عند درجة حرارة مرتفعة للجو اقترح ويلبر وميشيل استخدام دارتين متتاليتين للتبريد بالامتصاص كما هو موضح في الشكل (2-10)، حيث يستخدم هذا النظام دارتين متتاليتين للتبريد بالامتصاص حيث يتم تبريد مكثف وماص الدارة الأولى بمبخر الدارة الثانية. عندها تعمل الدارة الثانية عند درجة حرارة مبخر مرتفعة وتستخدم الحرارة الناتجة عن مكثف الدارة الثانية في تسخين مولد الدارة الأولى فقط، باستخدام الرموز الموضحة في الشكل التالي يحسب معامل أداء هذا النظام المكون من الدارتين معاً كما يلي:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{e1}}{\dot{Q}_{g2}} = \frac{\dot{Q}_{e1}}{\dot{Q}_{g1}} \times \frac{\dot{Q}_{g1}}{\dot{Q}_{g2}} \quad (2\text{-}8)$$

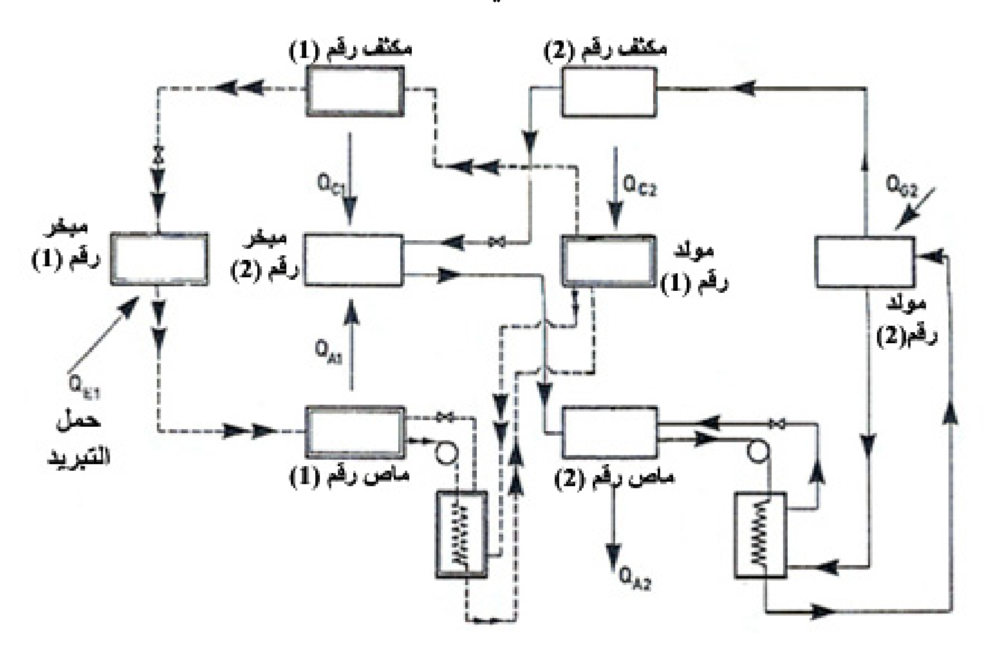
$$= (COP)_1 \times \frac{\dot{Q}_{g1}}{\dot{Q}_{e2}} \times \frac{\dot{Q}_{e2}}{\dot{Q}_{g2}} \quad (2\text{-}9)$$

$$= (COP)_1 \times \frac{\dot{Q}_{g1}}{\dot{Q}_{c1}+\dot{Q}_{a1}} \times (COP)_2 \quad (2\text{-}10)$$

$$= (COP)_1 \times \frac{\dot{Q}_{g1}}{\dot{Q}_{e1}+\dot{Q}_{g1}} \times (COP)_2 \qquad (2\text{-}11)$$

$$COP = \frac{(COP)_2}{1+\frac{1}{(COP)_1}} \qquad (2\text{-}12)$$

حيث $(COP)_2$ و $(COP)_1$ هما على التوالي معاملا الأداء للدارتين الأولى والثانية .



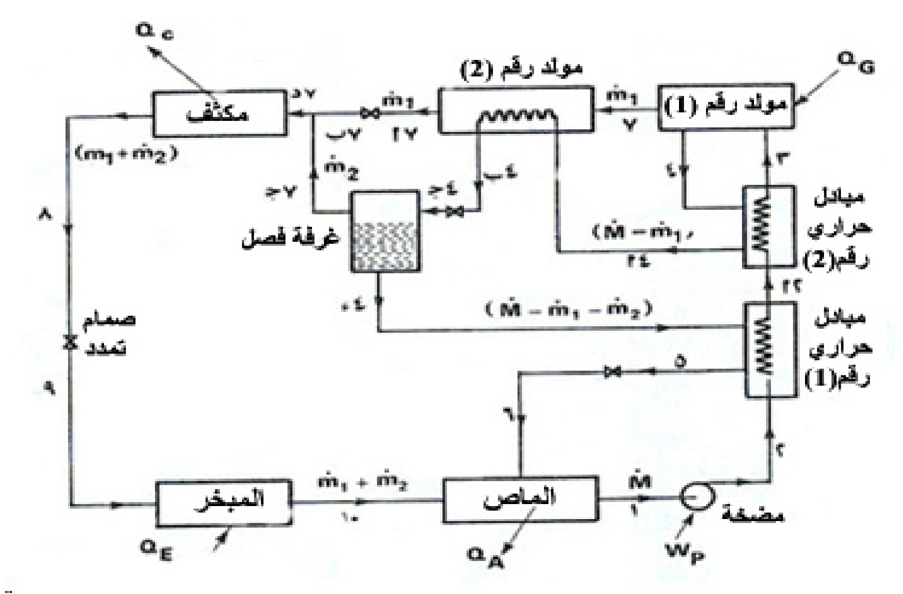
الشكل (2-10) استخدام دارتين متتاليتين للتبريد بالامتصاص

يُلاحظ من المعادلة السابقة انخفاض معامل أداء النظام عن معامل أداء أي من الدارتين، بالرغم من أن النظام يسمح باستخدام محلول الماء-بروميد الليثيوم عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً فيتم ذلك على حساب انخفاض معامل الأداء الكلي للنظام.

2-7- دارة التبريد ذات المرحلتين:

من الممكن تحسين معامل الأداء لدارة التبريد بالامتصاص باستخدام دارات التبريد الامتصاصية ذات المرحلتين.

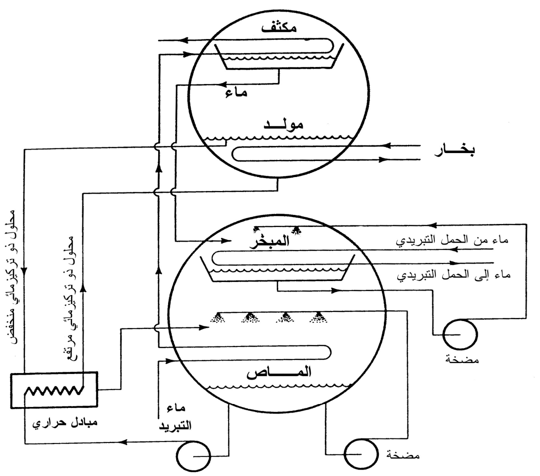
يوضح الشكل (2-11) دارة التبريد الامتصاصية ذات المرحلتين باستخدام محلول بروميد الليثيوم، حيث تستخدم الدارة مولدين وتتم إضافة الحرارة من المصدر الخارجي إلى المولد رقم 1 فقط، أما المولد الثاني فيستخدم طاقة بخار مائع التبريد الناتج في المولد الأول كمصدر حراري، وتعمل الدارة عند ثلاثة ضغوط: الضغط المرتفع وهو ضغط المولدين والضغط المتوسط وهو ضغط المكثف، وغرفة التبريد الفجائي والضغط المنخفض وهو ضغط المبخر ووعاء الامتصاص[2].

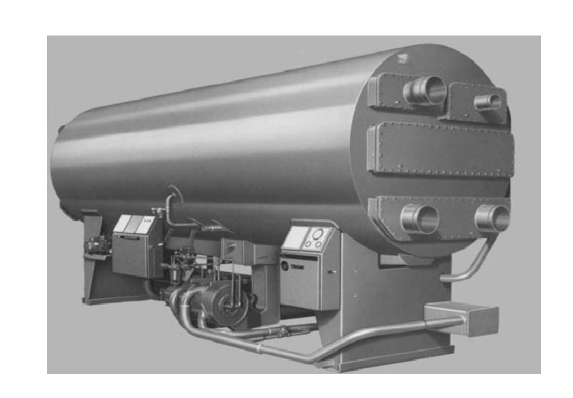


الشكل(2-11) دارة تبريد بالامتصاص ذات مرحلتين باستخدام محلول بروميد الليثيوم ماء

يتكون مائع التبريد في الدارة من جزأين: ينتج الجزء الأول في المولد الأول وينتج الجزء الثاني في غرفة التبخير الفجائي (الفصل) عندما ينخفض الضغط من الضغط المرتفع للمولد الثاني إلى الضغط المتوسط لغرفة التبخير الفجائي.

إن وحدات التبريد الامتصاصية الموجودة عملياً تحاول الاستفادة من فكرة أن كلا من المكثف والمولد يعملان عند نفس الضغط، وتقوم بجمع هذه العناصر في أسطوانة واحدة كذلك الأمر بالنسبة إلى المبخر ووعاء الامتصاص كما هو الحال في دارة التبريد الامتصاصية التي تعمل بمحلول بروميد الليثيوم ماء الموضحة بالشكل (2-12)، حيث ينتقل بخار الماء من المولد إلى المكثف في الأسطوانة العالية الضغط بينما في أسطوانة الضغط المنخفض ينطلق بخار الماء في المبخر وينتقل إلى وعاء الامتصاص[9].





الشكل (2-12) وحدة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة ذات اسطوانة واحدة من شركة TRANE

الفصل الثالث – محاكاة الأنظمة الحرارية الشمسية

3-1- مقدمة:

نظراً للتطور السريع في الحواسيب والبرمجيات فإن العديد من تصاميم الأنظمة الهندسية بدأت تعتمد على البرامج الحاسوبية في تطوير تصاميمها الهندسية وأصبح من الممكن الأخذ بعين الاعتبار العديد من المتغيرات والتفاصيل الدقيقة التي لولا وجود هذه البرمجيات لما أمكن الوصول إليها إلا بعد جهدٍ جهيد وخبرة عملية كبيرة، ومما يزيد الأمر صعوبة عند تصميم الأنظمة الشمسية أنها أنظمة غير مستقرة تعتمد على الطاقة الشمسية التي تتغير مع الزمن بطبيعتها، لهذا تعتبر برامج المحاكاة من أهم التطورات التي شهدها تصميم الأنظمة الهندسية وتطويرها لما لها من دورٍ كبير في تصميم الأنظمة وتحليلها والتنبؤ بأدائها [2].

يعتمد المبدأ الأساسي لبرنامج المحاكاة على إيجاد الحلول السريعة والدقيقة لمجموعة من النماذج الحسابية التي تتضمن مجموعة من المعادلات الواصفة للحالة الفيزيائية لعناصر النظام وتقوم بتقدير أداء النظام ككل والعمليات الحرارية التي تحصل فيه[15].

أجريت العديد من الدراسات التجريبية والمقارنات بين القيم التجريبية ونتائج برامج المحاكاة من خلال إيجاد أداء النظام والعناصر والمتغيرات في نقاط النظام المختلفة بهدف معرفة مدى التطابق بين النموذج المحاكي والنظام الحقيقي، وقد وصل الباحثون إلى نتائج تؤكد أنه من المناسب استخدام برامج محاكاة عند تحليل الأنظمة الحرارية الشمسية وتصميمها نتيجة حجم المعلومات والفوائد التي يمكن الحصول عليها بتكاليف أقل وخلال فترةٍ زمنية أقصر.

3-2- فوائد محاكاة الأنظمة الحرارية الشمسية:

إن برامج المحاكاة عبارة عن تجارب رقمية يمكنها تقديم الكثير من المعلومات عن الأداء الحراري لأي نظام بشكلٍ مشابه للمعلومات التي تقدمها التجارب الفيزيائية العملية، وتمتاز بأنها سريعة نسبياً وغير مكلفة إضافة إلى أن بعض البرامج تكون مزوّدة بدراسة التكاليف والوصول إلى التصميم الأمثل بأقل تكاليف ممكنة[15].

من الممكن أن نذكر فوائد محاكاة الأنظمة الهندسية بالنقاط التالية [25,24]:

- توفير تكاليف تشييد النماذج الأولية لأي نظام أو تطبيق.

- إمكانية تخطيط الأنظمة المعقدة وترتيبها بشكلٍ يسهل فهمه.
- الوصول إلى فهم كامل للنظام قيد التصميم من حيث ترتيب عمله وتفاعل العناصر المربوطة مع بعضها البعض.
- من الممكن التعديل والتغيير والوصول إلى الحالة الأمثل للعناصر وللنظام ككل.
- حساب مقدار الطاقات المتبادلة بين عناصر النظام.
- معرفة التغيرات في بارامترات النظام عند نقاط مختلفة منه وفي أزمنة مختلفة.
- حساب تأثير التغّيرات المتقلبة في التصميم على أداء النظام باستخدام ظروف مناخية مشابهة لعمله، حيث أن توفّر بيانات الطقس وتميُّز كثير من البرامج بمجالات واسعة من البيانات المناخية يسمح بتحديد مدى تأثيرات الظروف المناخية على التصميم [15].

3-3- برامج محاكاة الأنظمة الحرارية الشمسية :

يعتبر استخدام برامج المحاكاة في دراسة العمليات الحرارية الشمسية من التطورات الحديثة نسبياً وتعتبر مكمّلةً للتجارب الفيزيائية العملية [15]، حيث تكمن أهمية إجراء التجارب والقياسات على عناصر النظام في فهم سلوكها ومدى اعتمادية النماذج الرياضة الممثّلة لهذا العنصر، كذلك فإن إجراء القياسات التجريبية على النظام ككل من شأنه أن يسلّط الضوء على العديد من المشاكل والأعطال التي تحدث في أي نظام معقد، حيث يمكن على سبيل المثال استخدام برامج المحاكاة في إظهار مدى التأثير الذي يُحدثه تعطُّل مضخة التدوير أثناء تشغيل النظام.

إنه من الممكن حساب أي قيمة يجري قياسها تجريبياً، لكن عملياً يكون من الأسهل أن نقوم بحساب بعض المتغيرات على أن نقوم بقياسها. على سبيل المثال درجات الحرارة في بعض أجزاء النظام حيث يصعب وضع حساسات درجة الحرارة فيها، وبالتالي فإن برامج المحاكاة تناسب وبشكلٍ استثنائي الدراسات البارامترية، حيث تقدّم لمصممي النظام إمكانية اكتشاف تأثيرات المتغيرات التصميمية على الأداء طويل الأمد للنظام كما تقدّم فرصة تعديل النظام وتقييم تأثيرات تغييره واقتراح أشكالٍ بديلة له.

عموماً تمتاز برامج المحاكاة بقدرتها على حل مجموعة من المعادلات العادية والتفاضلية التي تمثل السلوك الفيزيائي لتجهيزات النظام.

تصنف برامج المحاكاة على مجموعتين [2]:

الأولى تتضمن برامج محاكاة خاصة (ذات غاية محددة) تقوم بمحاكاة أداء أنماط خاصة من الأنظمة، في هذه البرامج يتم دمج المعادلات التي تمثل العناصر وتبسيطها لإجراء الحسابات اللازمة، لهذا فإنها تكون سهلة الاستخدام إلا أنها محدودة المجال.

البرامج في المجموعة الثانية هي برامج محاكاة عامة (ذات مجالات أوسع) يمكن استخدامها وتطبيقها في العديد من الأنظمة الحرارية الشمسية، لكنها أكثر صعوبة من المجموعة الأولى، حيث يتم حفظ المعادلات التي تمثل العناصر (المجمعات الشمسية – المضخات – وحدات التخزين ..الخ) بصورة منفصلة ومن ثم حلها آنياً ولا تكون مُجمّعة كما ببرامج المجموعة الأولى.

إن المعلومات التي يمكن الحصول عليها من برامج المحاكاة قد تشمل الأداء الإجمالي للنظام خلال فترات زمنية تمتد من عدة أيام إلى عدة سنوات، لكن المدة الأساسية المتعارف على استخدامها في الدراسات الخاصة بأداء النظام وتكلفته هي السنة الواحدة.

كما يمكن تقدير الأوقات التي يحتاج فيها النظام (الذي يعتمد على الطاقة الشمسية) إلى طاقة مساعدة والعلاقة مابين هذه الأوقات والشروط المناخية. عموماً إن أي متغير يظهر في مجموعة المعادلات التي تمثل النموذج الرياضي للنظام يمكن التحقق منه ودراسة تغيراته مع الزمن .

هناك العديد من البرامج المستخدمة في عمليات النمذجة والتنبؤ بأداء الأنظمة الحرارية الشمسية لكن أهم هذه البرامج هي TRNSYS، WatSun، PolySun.

3-3-1- برنامج المحاكاة TRNSYS :

TRNSYS اختصار للعبارة **TR**a**N**sient **SY**stems **S**imulation program، هذا البرنامج تمّ تطويره في مختبر الطاقة الشمسية في جامعة Wisconsin في الولايات المتحدة الأمريكية [24]، ويعتبر بيئة محاكاة كاملة وقابلة للتوسع للأنظمة العابرة (المتغيرة مع الزمن) بما فيها الأنظمة الحرارية، أنظمة الطاقة المتجددة والمباني [47] .

خضع هذا البرنامج منذ عام 1976 للعديد من التعديلات حتى وصل إلى شكله الحالي اليوم بنسخة TRNSYS v.17.

يُستخدم هذا البرنامج من قبل الباحثين والمهندسين حول العالم لتطبيق المبادئ الحديثة للطاقة بدءاً بأنظمة تسخين المياه المنزلية البسيطة إلى محاكاة سلوك المباني وتجهيزاتها الحرارية والكهربائية وأنظمة التحكم مع الزمن[24].

تضم تطبيقات هذا البرنامج المجالات والنواحي التالية [15]:

- أنظمة الطاقة الشمسية (الحرارية الشمسية والكهرضوئية).
- أنظمة الأبنية المنخفضة التكلفة والأبنية المتعددة المناطق (multi-zone) .
- أنظمة التكييف بكل ما تتضمنه من عمليات تهوية وتبريد وتكييف.
- أنظمة الطاقة المتجددة (طاقة الرياح ،الطاقة الشمسية .... الخ).
- خلايا الوقود.
- أنظمة إعادة إنتاج الطاقة(regeneration).
- أنظمة التحكم والقدرة الكهربائية.

يتألف البرنامج من العديد من التوابع الفرعية والعناصر التي تمثل السلوك الفيزيائي لعناصر ومكونات مختلفة تمّ برمجتها اعتماداً على النموذج الرياضي الذي يتضمن معادلات جبرية وتفاضلية، يمكن ربط العناصر معاً بطريقة بسيطة وتشكيل النظام المتكامل[15].

عندما يتم تعريف كل المكونات وتحديدها ويجري توصيفها رياضياً يكون من الضروري ترتيب معلومات عن المخطط العام للنظام، والغاية منه هو تسهيل عملية تحديد العناصر (*Types*) وعملية ربط هذه العناصر وتبادل المعلومات فيما بينها[24].

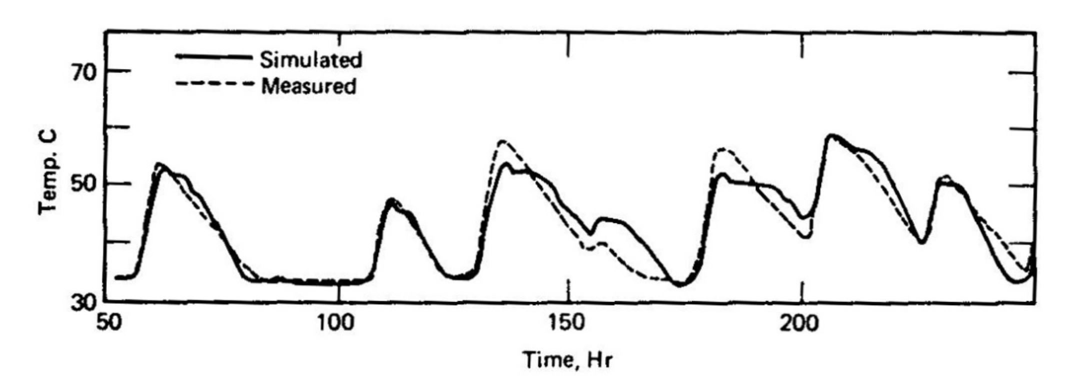
يتم تمثيل كل عنصر في النظام بــصندوق *box* حيث يتطلب عدداً من البارامترات الثابتة (*Parameters*) وعدداً من المُدخلات المتغيرة مع الزمن (*Inputs*)، عندما يتم تحديد قيم البارمترات والمدخلات من قبل المستخدم فإن البرنامج يقوم بحلٍ سريع لمختلف المعادلات وإظهار النتائج المطلوبة كمخرجات *Outputs*.

يمكن لمخرجات محددة أن تُستخدم كمدخلات لعدد من العناصر الأخرى [24]، حيث يُشكّل البرنامج ملفاً(*deck file*) يحوي معلومات عن كل عناصر النظام وملفاً عن بيانات الطقس المستخدمة وصيغة المخرجات.

من أهم عوامل نجاح هذا البرنامج وانتشاره هي البنية والتركيبة النمذجية (modular)التي تمّكن المستخدم من دراسة سلوك الأنظمة مع تغير الزمن وإمكانية تحسين أدائها وصولاً إلى التصميم الأمثل، إضافة إلى سهولة ربط هذا البرنامج بالبرامج الهندسية والرياضية الأخرى خلال عمليات الاستدعاء التفاعلي مثل(*Microsoft Excel, Matlab EES, COMIS..*)[47] .

يمكن أن تتنوع مستويات التعقيد في الحسابات وعلى المستخدم أن يحدد نوع درجة التعقيد من خلال التفاصيل التي يريد محاكاتها، حيث تتطلب التفاصيل الكثيرة الدقة درجة عالية من الجهد البرمجي والزمن خلال الحسابات[15].

أجريت العديد من الدراسات لتحديد مدى فعالية برنامج TRNSYS في محاكاة الأنظمة وقد أظهرت نتائج تلك الدراسات والمقارنات بين النتائج المُقاسة على الأنظمة الحقيقية العاملة ونتائج المحاكاة أن الخطأ الوسطي الذي يرتكبه هذا البرنامج لا يتجاوز الـــ 10% [24]، فمثلاً من أجل نموذج السيفون الحراري (*Thermosyphone SWH*) وجد أن دقة هذه النتائج حوالي4.7% [25] ، وكمثال آخر قام ميتشل عام 1980 باستخدام درجات حرارة مستودع التخزين الحراري وكمية الطاقة كمؤشرين على تشغيل العملية في مشروع تمت دراسته في جامعة ولاية كولورادو، المخطط التالي في الشكل (3-1) يوضح مقارنة بين درجات حرارة الخزان المحسوبة وتلك المُقاسة لأكثر من عشرة أيام [15].



الشكل (3-1) مقارنة بين النتائج التجريبية ونتائج المحاكاة على برنامج TRNSYS لبحث ميتشل.

بالإضافة إلى الفوائد والمميزات الواسعة التي يتميز بها هذا البرنامج فإنه يسمح للمستخدم بتطويره [15]، حيث يمكن إضافة عناصر جديدة غير متوفرة بمكتبة البرنامج من خلال برمجة النموذج الحسابي لهذه العناصر وفق قالب برمجي خاص بـــ*TRNSYS* يعتمد على لغات برمجية (*Fortran*، *C++*، *C*، *Pascal*).

الأجزاء الرئيسية للبرنامج :

يتألف برنامج *TRNSYS* الأساسي من البرامج الجزئية التالية [47]:

1. برنامج *The Simulation Studio* :

وهو الواجهة التخطيطية للبرنامج التي تمّكن المستخدم من رسم وتصميم الدارة والنظام واختيار العناصر من المكتبة وربطها مع بعضها البعض .

2. برنامج *TRNEdit*:

وهو الجزء الذي يمكّن المستخدم من تحويل عمليات المحاكاة إلى تطبيق بحد ذاته بحيث يصبح قابلاً للنشر والتوزيع دونما تعديل .

3. برنامج *TRNBuild*:

وهو برنامج خاص بتوصيف الأبنية المراد دراستها حرارياً.

4. عناصر البرنامج الأساسية *Standard TRNSYS Components*

تضم المكتبة الرئيسية: المجمعات الشمسية، أنظمة التخزين الحراري، أنظمة هيدروليكية وكهربائية، أنظمة تحكم، مبادلات حرارية، أنظمة التكييف، وعناصر أخرى كثيرة متممة.

5. مكتبات TESS:

وهي مكتبات قام مختصون في أنظمة الطاقة الحرارية(*TESS*) في مختبر *Madison*، جامعة *Wisconsin* في الولايات المتحدة الأمريكية. بتطويرها وإضافتها إلى برنامج الـــ *TRNSYS*، هذه المكتبات هي[47]:

- مكتبة العناصر التطبيقية .
- مكتبة عناصر التحكم .
- مكتبة المضخة الجيوحرارية .
- مكتبة الأبنية الصديقة للبيئة .
- مكتبة الأبنية الأرضية .
- مكتبة عناصر أنظمة التكييف– التهوية – التدفئة .
- مكتبة العناصر الهيدروجينية .
- مكتبة عناصر المباني والأحمال .
- مكتبة عناصر التصميم الأمثل .
- مكتبة المجمعات الشمسية .
- مكتبة مستودعات التخزين .
- مكتبة الملحقات .

1- برنامج *TRNflow*:

وهو برنامج ملحق بـــ *TRNSYS* لمحاكاة مجاري الهواء في الأبنية ذات المناطق المتعددة(Multi-zone Ducts)، هذا البرنامج المميز يتيح للمهندس المصمم

إجراء حسابات مفصلة في عمليات التهوية الطبيعية أو القسرية و التبريد و تحديد واجهات للمباني التي تعتمد على العديد من المتغيرات مثل حمولات الرياح ودرجات الحرارة داخل المبنى وخارجه.

إن توفر هكذا برنامج يوفر للمهندسين والباحثين جهود كبيرة ويعتبر إدخاله كأداة برمجية بيد المهندس خطوة هامة وكبيرة في مجال التصميم الهندسي لطاقة المباني.

2- برنامج *TRNSYSlite* :

وهو برنامج لإجراء محاكاة بسيطة لمبنى بمنطقة واحدة ، حيث أنه نتيجة المرونة الكبيرة التي يتمتع بها *TRNSYS* تم تشكيل هذه الأداة.

إن البنية النمذجية لبرنامج *TRNSYS* تجعل من عملية محاكاة المباني المتعددة المناطق معقدة نوعاً ما، لهذا تم إيجاد هذا البرنامج لتبسيط العملية ولجعل عملية المحاكاة بسيطة وميسّرة على كلٍ من المبتدئين والخبراء وفي الوقت نفسه من الممكن استثماره في التعليم.

2-3-3- برنامج المحاكاة *Watsun*:

برنامج محاكاة الأنظمة الشمسية الفعالة (*active solar systems*)، تم تطويره من قبل مختبر *Watsun* في جامعة *Waterloo* كندا خلال فترة سبعينيات وثمانينيات القرن الماضي، هذا البرنامج مزوّد ببيانات الطقس التي تتضمن القيم الساعية للإشعاع الكلي على سطح أفقي، درجة الحرارة الجافة، سرعة الرياح، الرطوبة النسبية، وبالنسبة للمواقع التي لا تتوفر فيها البيانات الساعية فإن البيانات هذه يتم توليدها بشكل اصطناعي، وإدخالها للبرنامج كقيم وسطية شهرية، يستطيع هذا البرنامج حساب حالة النظام كل ساعة وتقديم موجز شهري يتضمن تقارير ساعية وشهرية عن الإشعاع الشمسي الوارد، الطاقة المجمعة،الحمل ومقدار الطاقة المساعدة، كما تم تزويده بخيار التحليل الاقتصادي وحساب التكاليف. يقوم المستخدم بإدخال ملف واحد يدعى بيانات المحاكاة أما الخرج فيكون على شكل ثلاثة ملفات، ملف القائمة وملف البيانات الساعية، وملف البيانات الشهرية[24].

يستطيع هذا البرنامج محاكاة الأنظمة التالية [25]:

- نظام تسخين منزلي مع مبادل حراري.
- نظام تسخين منزلي مع مستودع تخزين حراري ذي طبقات حرارية.
- نظام تغير الطور وهو خاص بالماء المغلي.
- نظام تشغيل شمسي مع مستودع تخزين حراري.

- نظام تسخين حمامات السباحة الداخلية والخارجية.
- أنظمة التسخين الشمسية للأغراض الصناعية.
- الأنظمة المعتمدة على خزانات متغيرة الحجم.
- نظام تدفئة لغرفة في مبنى.

3-3-3- برنامج المحاكاة *Polysun*:

يقوم هذا البرنامج بإجراء عمليات محاكاة ديناميكية للأنظمة الحرارية الشمسية ويساعد في تحقيق الأمثلية، وهو سهل الاستخدام ويتيح للمستخدم من خلال بيئة واجهات مريحة إدخال ووضع مخطط النظام وتحديد مدخلات عناصره بسهولة، النسخة الحالية منه هي POLYSUN 4.2، كما يتميز ببيانات مناخية متوفرة لحوالي 6300 موقع حول العالم. تعتمد خوارزمية المحاكاة الديناميكية على خطوات زمنية متغيرة مع الأخذ بالحسبان هبوطات الضغط وتغير خواص المواد عند تغير درجات حرارتها[25].

أما الأنظمة التي يقوم البرنامج بنمذجتها فهي:

- أنظمة تسخين الماء المنزلية.
- أنظمة التدفئة.
- أنظمة التسخين في حمامات السباحة.
- أنظمة التسخين للأغراض الصناعية.
- أنظمة التبريد.

3-4- حدود عمل برامج المحاكاة:

على الرغم من أن برامج المحاكاة تقدم الكثير من الفوائد في عمليات تحليل وتصميم الأنظمة الحرارية فإنها لا تمثل صورة تامة عن الأنظمة الحقيقية. كما في الحسابات الهندسية فإنه من الممكن ارتكاب بعض الأخطاء أو افتراض بعض الثوابت الخاطئة أو إهمال بعض العوامل التي يكون لها أثر مهم، وبالتالي فإن الوصول إلى نتائج دقيقة وصحيحة يتطلب مستوىً عالٍ من المهارة والمقدرة العلمية[44].

يمكن نمذجة نظام بدرجةٍ عالية من الدقة للوصول إلى النتائج المطلوبة لكن عملياً يكون من الصعب إجراء تمثيل تفصيلي دقيق خلال النمذجة لبعض الظواهر أو الأعطال التي تحدث في الأنظمة الحقيقية مثل مشاكل التسربات أو انسداد الأنابيب، تعطل عناصر التحكم، مشاكل ضعف تثبيت المجمعات أو التجهيزات الأخرى أو العزل غير الكافي ...الخ، إضافةً إلى أن برامج محاكاة الأنظمة الحرارية تتعامل فقط مع السلوك الحراري للعمليات أما الاعتبارات الميكانيكية والهيدروليكية فإنها من الممكن أن تؤثر على الأداء الحراري لأنظمة الطاقة الشمسية.

بالنتيجة فإن برامج المحاكاة تعتبر أدوات مفيدة في عمليات النمذجة والتصميم والتطوير والتنبؤ بأداء الأنظمة وبالوقت ذاته لا يمكن الاستغناء عن الجانب التجريبي والذي بدوره يمكننا من التأكد من صحة النماذج الرياضية الموضوعة وضبط نتائجها. ويتطلب الوصول إلى نتائج دقيقة وقريبة من القيم الحقيقية المُقاسة على النظام دقةً ومهارة في التعامل مع هكذا برمجيات.

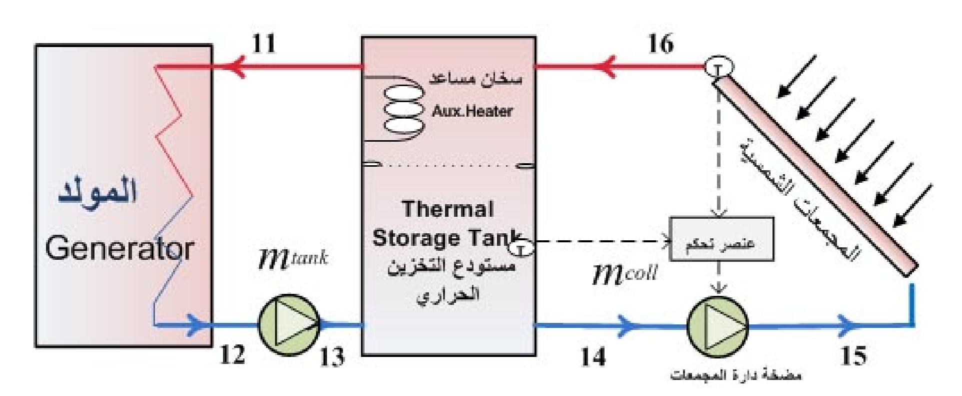
الفصل الرابع – توصيف وتحليل ترموديناميكي لنظام التبريد الامتصاصي الشمسي المقترح

4-1- مقدمة:

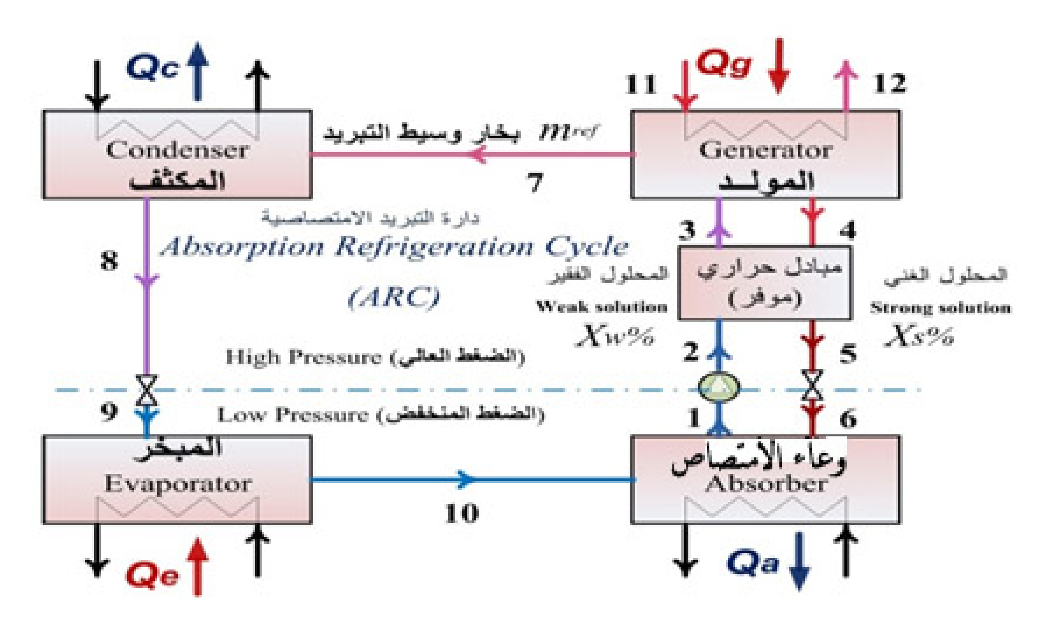
يتكون التصميم المقترح لمنظومة التبريد الامتصاصي الشمسي من دارة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة تعمل على الزوج العامل (ماء-بروميد الليثيوم)، وتزود حرارياً عبر إحدى الأنواع الثلاث المقترحة من المجمعات الشمسية، يتم تخزين الطاقة الحرارية الملتقطة من المجمعات الشمسية في مستودع تخزين حراري على شكل ماء ساخن يقوم بتغذية مولد البخار في الدارة الامتصاصية بالطاقة الحرارية، مع إمكانية استخدام مصدر إضافي للطاقة (سخّان مساعد) كمشاركة جزئية في إنتاج الطاقة الحرارية المطلوبة.

سنعتمد في دراستنا تصميم منظومة تبريد امتصاصية شمسية مشتركة مع تخزين حراري للماء الساخن ومصدر حراري مساعد(سخان) قادرة على إنتاج الطاقة اللازمة لتغطية حمل التبريد وضمان استقرار عمل نظام دارة التبريد الامتصاصية خلال ساعات النهار مع زيادة فاعلية استغلال الطاقة الشمسية، ودراسة تفصيلية عن السلوك الحراري مع الزمن لأهم المتغيرات وظروف التشغيل المؤثرة على أداء دارة التبريد مع تفادي المشاكل المتعلقة بالتبلور من خلال أخذ الاحتياطات المناسبة.

يوضح الشكل(4-1) مخططاً لدارة المجمعات الشمسية التي تتضمن المجمعات الشمسية والخزان الحراري والسخّان المساعد، أما الشكل(4-2) فإنه يوضح مخططاً لدارة التبريد الامتصاصية بمرحلة واحدة التي تستخدم(ماء – بروميد الليثيوم) كزوج عامل.



شكل(4-1) دارة المجمعات الشمسية ومستودع التخزين الحراري مع سخان مساعد



الشكل (4-2) مخطط لدارة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة وتستخدم (ماء – بروميد الليثيوم) كزوج عامل.

يقوم الماء في محلول بروميد الليثيوم بدور وسيط التبريد أما ملح بروميد الليثيوم فإنه يقوم بدور المادة الماصة، تتكون الدارة الامتصاصية من المولد، المبخر، وعاء الامتصاص، المكثف، مضخة للمحلول السائل وصمامات تمدد، أما دارة التغذية بالطاقة الشمسية فتتكون من مجمعات شمسية و مستودع للتخزين الحراري مع سخان حراري مساعد[13].

يستخدم مولد الدارة الامتصاصية الطاقة الشمسية التي تقوم المجمعات الشمسية بالتقاطها وتجميعها في تشكيل بخار ماء بفصله عن المحلول السائل، حيث يتدفق هذا البخار المتشكل عند درجة حرارة وضغط مرتفعين إلى المكثف بينما يعود المحلول السائل المُسخّن الغني بالملح إلى وعاء الامتصاص عبر صمام التمدد الذي يؤمن فرقاً في الضغط بين المولد ووعاء الامتصاص، يتم في المكثف تبريد بخار الماء وتكثيفه إلى سائل مشبع ثم يمرر عبر صمام التمدد الثاني الذي يخفض ضغط وسيط التبريد ثم يمرر عبر المبخر حيث يجري تبخيره من جديد، عملية تبخير الماء عند ضغط منخفض هو ضغط المبخر تؤمن التأثير التبريدي المطلوب وسحب الحرارة من المكان المطلوب تبريده.

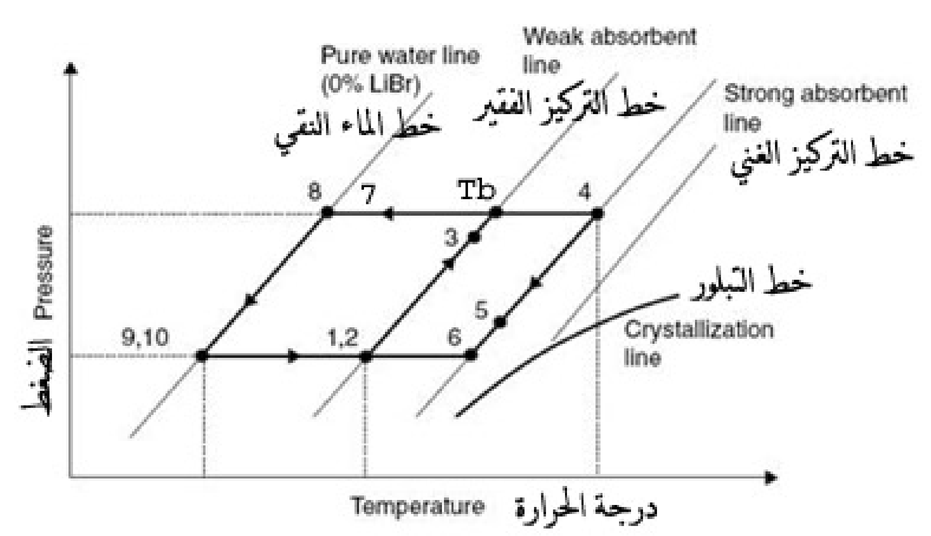
في وعاء الامتصاص يقوم المحلول الغني (العالي التركيز بالملح) بامتصاص بخار الماء القادم من المبخر مشكلاً محلولاً فقيراً (بالملح) ويطرح الحرارة إلى ماء التبريد، يعاد ضخ هذا المحلول الفقير إلى المولد عبر مبادل حراري، وفيه تنتقل الحرارة من المحلول الغني المُسخّن والخارج من المولد إلى المحلول الفقير قبل دخوله المولد، مما يساعد على

توفير جزء كبير من الطاقة الحرارية كما يساعد على تخفيض درجة حرارة المحلول المتدفق إلى وعاء الامتصاص.

من الضروري تبريد وعاء الامتصاص بصورة كافية ومستمرة للحصول على أقل درجة ممكنة عند خط السحب مما يضمن عدم وجود بخار ماء في خط السحب للمضخة ويساعد أيضاً على تصميم المبخر لدرجة حرارة أقل منها في حالة ما إذا تم تبريد وعاء الامتصاص بالهواء. عادةً يستخدم ماء تبريد وعاء الامتصاص في تبريد المكثف ثم يعاد تبريده بوساطة برج تبريد قبل أن يعود إلى وعاء الامتصاص مرةً أخرى [2].

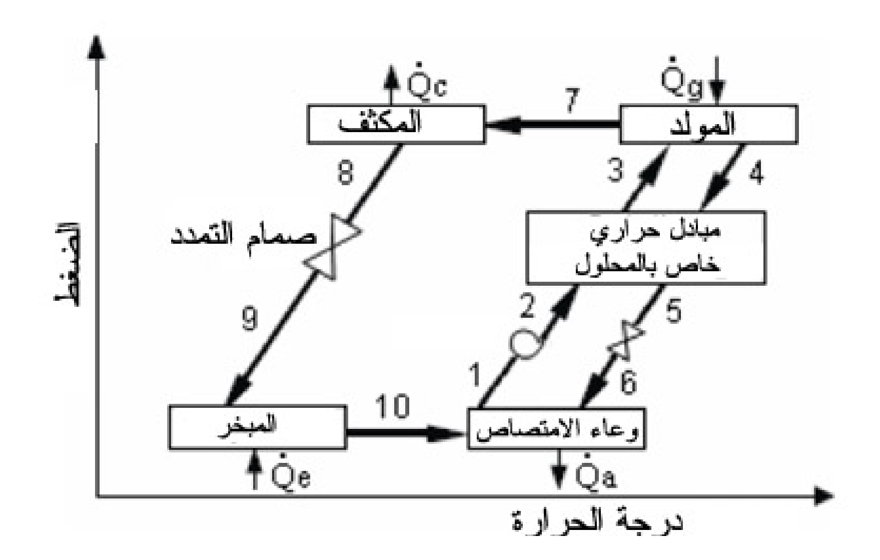
من الضروري أيضاً أخذ الاحتياطات اللازمة لتفادي إمكانية تبلور المحلول عند النقطة 6 في الدارة (نقطة دخول المحلول الغني بالملح إلى وعاء الامتصاص) وهذا يحدث عند ارتفاع درجة حرارة المولد بصورة كبيرة بحيث تصل درجة تركيز بروميد الليثيوم في المحلول إلى الحد الذي يسبب التبلور عندما ينخفض ضغط المحلول قبل الدخول إلى وعاء الامتصاص.

يوضح الشكل (4-3) خطوط التركيز الثابتة لمحلول بروميد الليثيوم – ماء على مخطط داورنغ (Duhring chart) للعلاقة بين درجة الحرارة والضغط ، حيث يشير الخط المائل على اليسار إلى خط الماء النقي بينما يشير المنحني على اليمين إلى خط التبلور [19].



الشكل (4-3) دارة التبريد الامتصاصية (بروميد الليثيوم – ماء) بمرحلة واحدة على مخطط داورنغ

أما الشكل (4-4) فإنه يوضح تمثيل الدارة الامتصاصية بشكل صندوقي على مخطط درجة الحرارة–ضغط.



الشكل(4-4) مخطط لدارة بروميد الليثيوم– ماء الامتصاصية بمرحلة واحدة

يوضح المخطط في الملحق (ب–2) العلاقة بين درجة حرارة المحلول عند التوازن الحراري (أي عند درجة الحرارة التي يبدأ عندها تبخر الماء في المحلول) مع تركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند قيم مختلفة للضغط، أما المخطط في الملحق(ب–1) فإنه يوضح العلاقة بين إنتالبي المحلول وتركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند درجات حرارة مختلفة.

المجمّعات الشمسية المقترحة في الدراسة الحالية هي:

- المجمّعات الشمسية المستوية *Flat - Plate Collectors (FPC)* .
- المجمّعات الأنبوبية المفرغة *Evacuated Tube Collectors (ETC)* .
- المجمّعات القطعية المركبة

Compound Parabolic Collectors(CPC) .

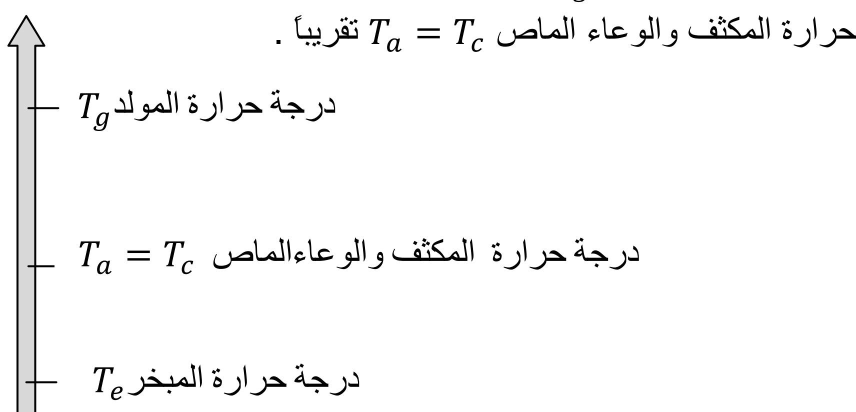
تتميز جميع هذه المجمعات بأنها من النمط الثابت وتتميز بأنها بسيطة وعملية أكثر من حيث الدراسة والتصنيع مقارنة بالمجمعات المدعومة بمحاور حركة أحادية أو ثنائية ، والأهم هو أنها تتناسب مع تطبيقات المجمعات الشمسية الحرارية في التبريد.

4-2- التحليل الترموديناميكي لدارة التبريد الامتصاصية:

إن كثرة المتغيرات التصميمية في دارة التبريد الامتصاصية تجعل عملية تحديد معامل الأداء عند ظروف التشغيل المختلفة أمراً صعباً وخاصة أن ثمة العديد من العوامل والمتغيرات التي تؤثر مباشرة على معامل الأداء .لهذا ومن أجل تبسيط عملية نمذجة النظام تم اعتماد عدد من الفرضيات الأساسية [25]:

- المضخة ايزونتروبية وقيمة العمل اللازم لتشغيلها مهمل مقارنة بكمية الحرارة المضافة في المولد .
- حالة وسيط التبريد (الماء النقي) ثابتة ومستقرة.
- الضياعات الحرارية وهبوط الضغط في العناصر أو الأنابيب مهملة.
- عمليات التمدد في الصمامات تحت إنتالبي ثابت.
- بخار الماء الذي ينفصل عن المحلول ويغادر المولد لا يحمل معه أي نسبة من الملح (بروميد الليثيوم).
- المحلول عند مخرج وعاء الامتصاص والمولد والمكثف يكون في حالة سائل مشبع.
- يخرج بخار الماء من المبخر في حالة الإشباع.

تتميز الدارة الامتصاصية بثلاث مستويات طاقية من حيث درجة الحرارة والموضحة بالشكل (4-5)، يمكن الاعتماد على هذه السويات الطاقية في تصميم الآلة الامتصاصية حيث يحدد نوع التطبيق درجة حرارة المبخر T_e، كما يحدد معامل أداء الدارة درجة حرارة المولد المطلوب تأمينها T_g ، أما الموقع الجغرافي وحالة وسيط التكاثف فإنها تُحدد درجات حرارة المكثف والوعاء الماص $T_a = T_c$ تقريباً .



الشكل(4-5) يوضح السويات الطاقية للدارة الامتصاصية أحادية المرحلة

تقتضي طبيعة التصميم أن يتم اختيار درجة حرارة المولد التي تضمن تحرير وسيط التبريد من المحلول دون أن تقترب من حدود تبلور المحلول، يتم من خلال تحديد درجة حرارة المبخر الحصول على ضغط الإشباع (الضغط المنخفض بالدارة) ومن خلال تحديد الموقع الجغرافي ووسيط التكاثف يتم الحصول على تركيز المحلول الفقير وضغط التكاثف (الضغط المرتفع بالدارة) وهو بدوره يقود إلى معرفة تركيز المحلول الغني.

تم في هذا البحث الافتراض أن قيم تركيز المحلول الغني والفقير ثابتة بهدف إجراء مقارنة مع أبحاث أخرى، كما تم الافتراض أن الفرق في درجات الحرارة بين بخار الماء

والمحلول عند خروجهما من المولد هو 4[°C] ، حيث تؤكد كثير من النتائج التجريبية عليها[25,7,19] . مع التأكيد أن هذا الفرضيات لا تخالف منطق الاستثمار والتشغيل المذكورة سابقاً.

المُدخلات الأساسية التي تم اعتمادها في حسابات الدارة الامتصاصية هي:

- استطاعة التبريد المطلوبة (*cooling capacity*) $\dot{Q}_e \quad [W]$
- درجة حرارة المبخر $T_{10} \quad [°C]$
- درجة حرارة المحلول عند مخرج المولد $T_4 \quad [°C]$
- تركيز المحلول الغني (بالملح) % $X_s \quad \% \, LiBr \; [-]$
- تركيز المحلول الفقير بالملح % $X_w \quad \% \, LiBr \; [-]$

مواصفات المبادل الحراري للمحلول فإنه سيتم اعتباره متغيراً تصميمياً من خلال الناقلية الحرارية الإجمالية $U.A \; [\frac{W}{°C}]$.

يتضمن النموذج الرياضي لدارة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة التي تستخدم الزوج العامل (ماء– بروميد الليثيوم) من أربع مجموعات من المعادلات: معادلات توازن الكتلة، توازن الطاقة، علاقات تصف انتقال الحرارة ومعادلات تصف الخواص الترموديناميكية للموائع العاملة [25].

توازن كتلة إجمالية (4-1)
$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0$$

توازن كتلة بروميد الليثيوم (4-2)
$$\sum (\dot{m}.x)_{in} - \sum (\dot{m}.x)_{out} = 0$$

(4-3)
$$\sum (\dot{m}.h)_{in} - \sum (\dot{m}.h)_{out} + \left[\sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out}\right] + \dot{W} = 0$$

(4-4)
$$\dot{Q}_a + \dot{Q}_c = \dot{Q}_g + \dot{Q}_e + \dot{W}_P$$

- تحليل المبخر : معادلة توازن الكتلة على طرفي المبخر هي:

(4-5)
$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

معادلة التوازن الطاقي

(4-6)
$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_9)$$

- صمامات التمدد : التمدد أديباتي في صمامات التمدد و الإنتالبي على طرفيها يبقى ثابتاً.

(4-7)
$$h_8 = h_9 \qquad \& \qquad h_5 = h_6$$

- تحليل وعاء الامتصاص :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \tag{4-8}$$
$$X_1\dot{m}_1 = X_6\dot{m}_6 \tag{4-9}$$
$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{ref} \tag{4-10}$$
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{ws} \tag{4-11}$$
$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{ss} \tag{4-12}$$
$$\dot{m}_{ss} = \dot{m}_{ws} - \dot{m}_{ref} \tag{4-13}$$
$$X_S = X_4 = X_5 = X_6 \tag{4-14}$$
$$X_W = X_1 = X_2 = X_3 \tag{4-15}$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_1 h_1 \tag{4-16}$$

- تحليل المبادل الحراري للمحلول :

المبادل الحراري ذو جريان متعاكس ومنفصل بمدخلين ومخرجين ،الطرف الساخن محلول غني بالملح والطرف البارد محلول فقير .

معدل السعة الحرارية للمحلول في الطرف الساخن.

$$C_h = \dot{m}_h . C_{ph} = \dot{m}_6 C_{p6}. \tag{4-17}$$

أما السعة الحرارية لمحلول بروميد الليثيوم فإنها يتعلق بالتركيز وفق المعادلات[3] :

$$C_{ph} = 2.01\left(\frac{X_{ss}}{100}\right)^2 - 5.15\left(\frac{X_{ss}}{100}\right) + 4.23 \quad \left[\frac{kJ}{kg.℃}\right] \tag{4-18}$$

$$C_{pc} = 2.01\left(\frac{X_{ws}}{100}\right)^2 - 5.15\left(\frac{X_{ws}}{100}\right) + 4.23 \quad \left[\frac{kJ}{kg.℃}\right] \tag{4-19}$$

- المضخة :

مع إهمال الضياعات الميكانيكية والكهربائية نظراً للقيمة الصغيرة لعمل المضخة.

$$\dot{W}_P = \dot{m}_2 v_2 (P_2 - P_1) \tag{4-20}$$
$$\dot{W} = \dot{m}_{ws}\frac{1}{\rho_2}\left(P_{High} - P_{Low}\right).10^3 \quad [W] \tag{4-21}$$
$$P_{High} = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_7 = P_8 \tag{4-22}$$
$$P_{Low} = P_1 = P_6 = P_9 = P_{10} \tag{4-23}$$

أما الكتلة النوعية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء [19] فهي:

$$\rho_x = 1145.36 + 470.84X_O + 1374X_O^2 - (0.333393 + 0.571749X_O)(273 + T) \quad (4\text{-}24)$$

حيث تعطي هذه المعادلات نتائج مقبولة ضمن المجال:

$X_O = X/100$ ، $20\% < X < 60\%$

أما درجة حرارة المحلول فهي ضمن المجال $0 < T < 200\ ^oC$.

ρ_x : كثافة محلول بروميد الليثيوم – ماء $[kg/m^3]$.

$$C_c = \dot{m}_{ws}.C_{pc} \quad C_h = \dot{m}_{ss}.C_{ph} \quad (4\text{-}25)$$

$$C_{min} = C_h \quad [kW/^oC] \quad (4\text{-}26)$$

حيث يكون معدل التدفق للمائع الساخن أكبر مقارنة بالبارد أما السعة الحرارية النوعية بين المائعين الساخن والبارد فهي تقريباً ثابتة.

$$NTU = \frac{U.A}{C_{min}} \quad (4\text{-}27)$$

فعالية المبادل الحراري الخاص بالمحلول:

$$\varepsilon_{shx} = \frac{1-e^{-(1-\frac{C_h}{C_c})NTU}}{1-\frac{C_h}{C_c}e^{-(1-\frac{C_h}{C_c})NTU}} \quad (4\text{-}28)$$

استطاعة المبادل الحراري :

$$\dot{Q}_{HX} = \varepsilon_{shx}.C_{min}.(T_4 - T_2)_{in} \quad (4\text{-}29)$$

درجات الحرارة عند الخروج من المبادل الحراري :

$$T_5 = T_4 - \frac{\dot{Q}_{shx}}{C_h} \quad [°C] \quad (4\text{-}30)$$

$$T_3 = T_2 + \frac{\dot{Q}_{shx}}{C_c} \quad [°C] \quad (4\text{-}31)$$

- تحليل المولد : معادلة التوازن الطاقي على طرفي المولد

$$\dot{Q}_g + \dot{m}_3h_3 = \dot{m}_4h_4 + \dot{m}_7h_7 \quad (4\text{-}32)$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_4h_4 + \dot{m}_7h_7 - \dot{m}_3h_3 \quad (4\text{-}33)$$

- استطاعة المكثف :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_7(h_7 - h_8) \qquad (4\text{-}34)$$

- معامل الأداء :

معامل الأداء للدارة يمثل نسبة حمل التبريد (معدل الحرارة المسحوبة بالمبخر) $\dot{Q}_e$ إلى معدل الحرارة المقدمة إلى المولد $\dot{Q}_g$

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \qquad (4\text{-}35)$$

أما المعادلات الخاصة بالخواص الترموديناميكية من درجة حرارة وتركيز وضغط وإنتالبي لمحلول بروميد الليثيوم –ماء فهي [7]:

- معادلة إنتالبي المحلول بدلالة درجة حرارته وتركيزه :

$$h = \sum_0^4 A_n X^n + t\sum_0^4 B_n X^n + t^2\sum_0^4 C_n X^n \quad \left[\frac{kJ}{kg}\right] ; \quad t\ [°C]; \quad x: \%[BrLi] \qquad (4\text{-}36)$$

A_0=-2024.33	B_0=18.2829	C_0= -3.7008214 .10^{-2}
A_1=163.309	B_1=-1.1691757	C_1=2.8877666.10^{-3}
A_2=-4.88161	B_2=3.248041 . 10^{-2}	C_2=-8.1313015 .10^{-5}
A_3=6.302948 .10^{-2}	B_3=-4.034184.10^{-4}	C_3=9.9116628.10^{-7}
A_4=-2.913705. 10^{-4}	B_4=1.8520569.10^{-6}	C_4=-4.4441207.10^{-9}

- معادلة درجة حرارة الإشباع للمحلول بدلالة التركيز ودرجة حرارة وسيط التبريد عند نفس الضغط:

$$t_s = \sum_0^3 B_n X^n + t_{ref}\sum_0^3 A_n X^n \quad ; \quad t\ [°C] \qquad (4\text{-}37)$$

درجة حرارة وسيط التبريد بدلالة التركيز ودرجة حرارة إشباع المزيج عند نفس الضغط:

$$t_{ref} = (t - \sum_0^3 B_n X^n)/\sum_0^3 A_n X^n \quad ; \quad t_{ref}\ [°C] \qquad (4\text{-}38)$$

$$\log P = C + \frac{D}{t_{ref}+273.15} + \frac{E}{(t_{ref}+273.15)^2} \quad ; \quad P\ [kPa] \qquad (4\text{-}39)$$

حيث مجالات درجات الحرارة والتركيز كما يلي :

$$-15 < t_{ref} < 110\ °C$$

$$5 < t < 175\ °C$$

$$45 < X < 70\%\ \ LiBr$$

أما الثوابت فهي كما يلي :

A_0=-2.00755 B_0=124.937 C= 7.05

A_1=0.16976 B_1=-7.71649 D= -1596.49

A_2=-3.133362 .10^{-3} B_2=0.152286 E= -104095.5

A_3=1.97668 .10^{-5} B_3=-7.95090 .10^{-4}

4-3- التحليل الترموديناميكي لدارة المجمعات الشمسية ومستودع التخزين الحراري:

إنّ أداء نظام المجمعات الشمسية – خزان يمكن تحليله باستخدام نموذج هوتيل– ويلر- ويليس. حيث أن كمية الحرارة المستفادة من المجمعات الشمسية تكتب بالعلاقة التالية[30]:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{coll} C_{pw} (T_o - T_i) \qquad (4\text{-}41)$$

وبالتالي فإن كفاءة المجمع الشمسي التي تمثل نسبة الحرارة المستفادة التي تصل المائع لكل وحدة مساحة إلى الإشعاع الكلي الساقط على السطح العلوي للمجمع تحسب بالمعادلة:

$$\eta_c = \frac{Q_u / A_c}{I_t} \qquad (4\text{-}42)$$

$$\eta_c = F_R \left[(\tau\alpha)_n - U_L \left(\frac{T_{in} - T_a}{I_t} \right) \right] \qquad (4\text{-}43)$$

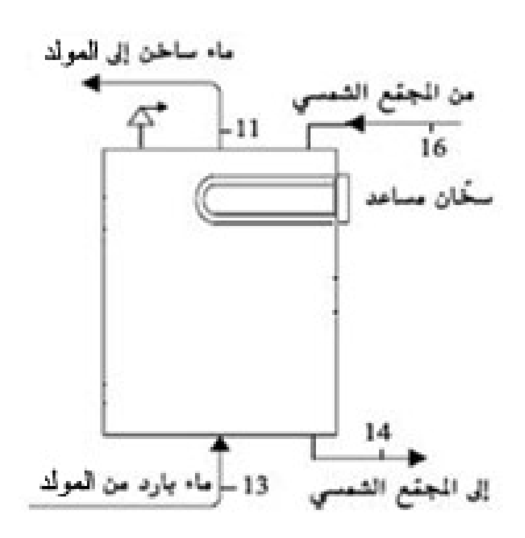
حيث : T_a تمثل درجة حرارة الجو المحيط .

T_{in} درجة حرارة الدخول للمجمع .

يمكن كتابة علاقة الطاقة الملتقطة من المجمعات الشمسية بالعلاقة التالية :

$$\dot{Q}_u = A_c . F_R [I_t (\tau\alpha)_n - U_L (T_{in} - T_a)] \qquad (4\text{-}44)$$

إن توفر الطاقة الشمسية لا يتناسب دائماً مع الطاقة المطلوب تأمينها لتغطية حمل التبريد لهذا فإن مستودع التخزين الحراري يعمل على تحقيق هذا التناسب بحيث يقوم بتخزين الطاقة الشمسية الزائدة كما ويزود بطاقة إضافية عن طريق سخان مساعد عندما تكون الطاقة الملتقطة من المجمعات الشمسية غير كافية. في الحالات التي لا تكون فيها الطاقة المجمّعة كافية ولا تستطيع معها الطاقة المخزنة أن تلبي الحاجة المطلوبة فإنه من الممكن تشغيل السخانات المساعدة الإضافية المتوضّعة داخل الخزان، يوضح الشكل(4-6) خزاناً حرارياً للماء الساخن ذا توضع طبقي ومزود بسخان مساعد واحد، حيث تزداد درجة حرارة الماء في الخزان من القاعدة إلى القمة وتعتمد عمليات توضع السخانات والعقد والحساسات على حجم الخزان وتوضّعه وتصميم مداخله ومخارجه ومعدلات التدفق.



الشكل(4-6) مستودع تخزين حراري ذو توضع طبقي مع سخان مساعد

إن وجود السخان الإضافي يسمح برفع درجات الحرارة للماء الساخن من درجة حرارة مستودع التخزين إلى درجة حرارة مرجعية بحيث يعمل فقط عندما تنخفض درجة الحرارة في مستوى في محدد مستودع التخزين إلى ما دون درجة الحرارة المرجعية T_{set}(التي يمكن اعتبارها درجة حرارة الدخل الأصغرية للماء الساخن)، فإذا كانت درجة الحرارة الوسطية للخزان T_s ومعدل التدفق الكتلي للماء المستخدم من قبل المولد $\dot{m}_{tank}$ فإن استطاعة التسخين المساعد التقريبية تحسب من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_{aux} = \dot{m}_{tank} C_{pw} (T_{set} - T_s) \qquad (4\text{-}45)$$

نسمي نسبة الفرق بين استطاعة المولد $\dot{Q}_g$ واستطاعة التسخين$\dot{Q}_{aux}$ إلى استطاعة المولد بنسبة التغطية الشمسية:

أما المعادلة التي تصف استطاعة التخزين الحراري (معدل الطاقة المنتقلة من الخزان للحمل) فهي كالتالي:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_{tank} C_{pw} (T_{11} - T_{13}) \qquad (4\text{-}46)$$

أما الاستطاعة الحرارية المنتقلة من المجمعات الشمسية إلى الخزان فهي كالتالي [38] :

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{coll} C_{pw} (T_{16} - T_{14}) \qquad (4\text{-}47)$$

من الممكن كتابة معادلة التوازن الطاقي في الخزان بالشكل التالي[38] :

$$m_i . C_{pw} . \left(\frac{dT}{dt}\right)_i = \dot{m}_{coll} C_{pw} (T_{16} - T_{14}) - \dot{m}_{tank} C_{pw} (T_{11} - T_{13}) - U . A_i . (T_i - T_{env}) + \dot{Q}_{aux.i} \qquad (4\text{-}48)$$

حيث i المستوى في النقطة i من الخزان(على الارتفاع).

$\dot{m}_{coll}$ ، $\dot{m}_{tank}$ معدل التدفق في دارة المجمعات الشمسية، دارة الخزان على الترتيب.

C_{pw} السعة الحرارية النوعية للماء (الوسيط العامل في الدارتين).

A_iمساحة سطح التبادل الحراري بين الخزان حتى المستوي i والوسط المحيط.

T_i ، T_{env} درجات الحرارة في الموقع i والوسط المحيط على الترتيب.

$\dot{Q}_{aux.i}$ معدل الطاقة المدخلة من عنصر التسخين في الموقع i .

الفصل الخامس– تشكيل النموذج المحاكي للنظام على برنامج TRNSYS

5-1- خطوات العمل على تشكيل النموذج المحاكي :

تم استخدام برنامج TRNSYS وتطويره من أجل نمذجة ومحاكاة كلٍ من نظام المجمّعات الشمسية ونظام التبريد الامتصاصي وفق الخطوات التالية والموضحة بالمخطط (5-1):

- تم اختيار الظروف المناخية وبيانات الطقس في مدينة حلب موقع تشغيل النظام.
- تم برمجة عنصر الدارة الامتصاصية Type 210 بلغة الفورتران وإضافته إلى مكتبة البرنامج الأساسية كما تمت برمجة تابع فرعيsubroutine يحسب الخواص الترموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم–ماء.
- تم اختيار كل عناصر النظام من المكتبة الأساسية والإضافية وفق الجدول(5-1).
- تم ربط العناصر المختارة ببعضها وفقاً للنموذج الرياضي المقترح.
- تم ضبط وتعديل المتغيرات والمدخلات لكل العناصر بما يتوافق مع شروط عمل النظام.
- اختيار القيم المثلى للمتغيرات التشغيلية والتصميمية بعد القيام بتشغيل متكرر للنظام المحاكي.

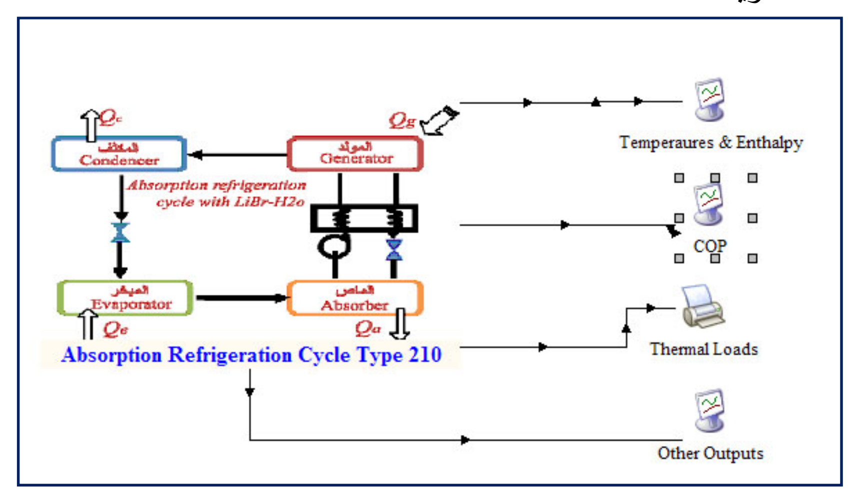


الشكل(5-1) خطوات تشكيل النموذج المحاكي على برنامج TRNSYS

الجدول(5-1) العناصر الأساسية المستخدمة في تشكيل النموذج المحاكي في برنامج TRNSYS.

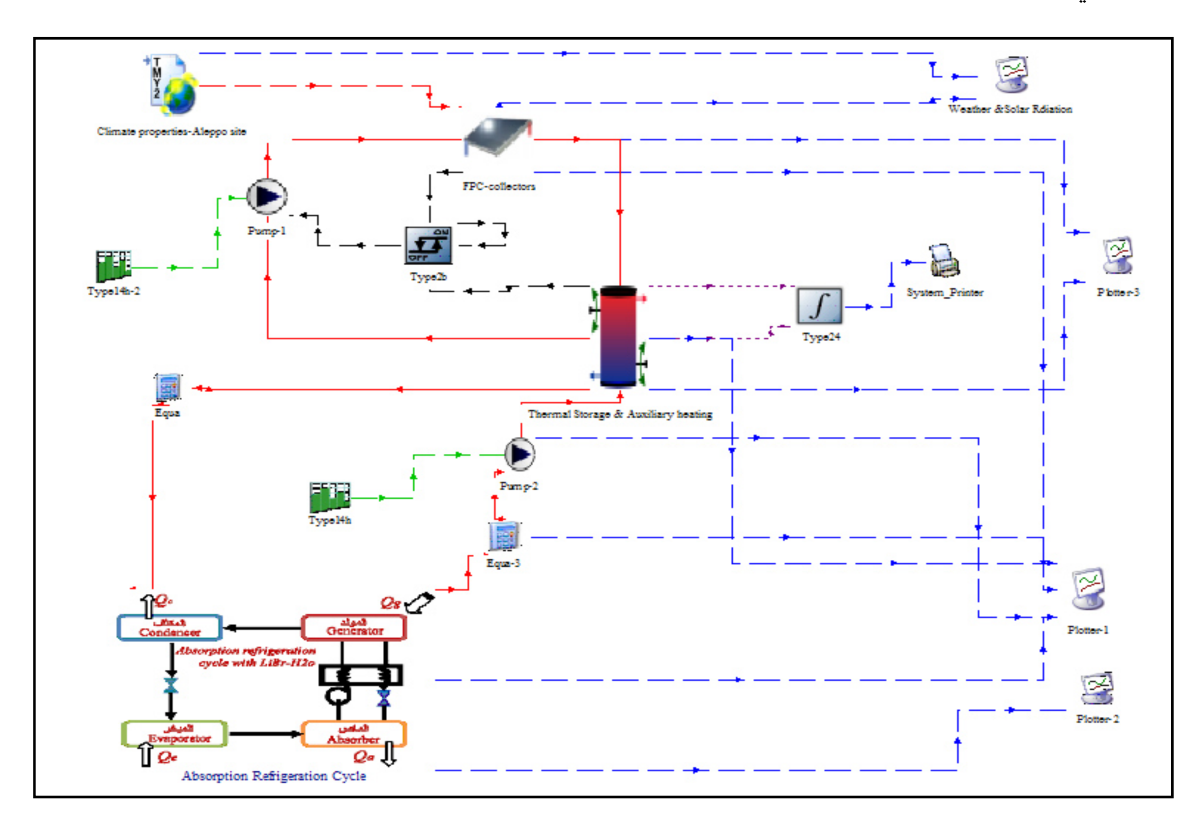
Library Name اسم المكتبة	Type Name العنصر	Description توصيف العنصر
Weather Data Reading& Processing	Type 109-TMY2	عنصر البيانات المناخية
	Type 15-2	نسخة محدّثة من البيانات المناخية
Solar Thermal Collector	Type 73	FPC مجمع السطح المستوي
	Type 71	ETC المجمع الأنبوبي المفرغ
	Type 74	CPC المجمع القطعي المركب
Thermal Storage	Type 4c	مستودع التخزين الحراري السائل
Hydronics	Type 3b	مضخة
Controllers	Type 2b	عنصر تحكم
Outputs	Type 24a	طباعة النتائج
	Type 65d	رسم النتائج على مخططات
Utility	Type 14h	جدول عمل زمني
	Type 24	عنصر تكامل كمي
ARC	Type 210	عنصر دارة التبريد الامتصاصية

إن إضافة عنصر الدارة الامتصاصية Type 210 إلى البرنامج تفيد في استخدامه في تحليل الحساسية ومعرفة التغيرات البارامترية ودرجات الحرارة والتراكيز والأحمال الحرارية للعناصر المختلفة على معامل الأداء ويمثل الخطوة التمهيدية قبل ربطه بالنظام الشمسي والمحاكاة طويلة الأمد.



الشكل(5-2) عنصر الدارة الامتصاصية Type 210 المبرمج على TRNSYS

تم تشكيل النموذج المحاكي وربط العناصر معاً كما هو موضح في الشكل(3-5) بالنسبة للنموذج الخاص بالمجمعات المسطحة المستوية، النماذج الأخرى مشابهة والفرق الوحيد هو نوع المجمّع الشمسي.



الشكل(3-5) مخطط يوضح عناصر النموذج المحاكي وطريقة الربط على برنامج TRNSYS

الفصل السادس – النتائج والمناقشة

1-6 – الحالة المدروسة:

إن كثرة المتغيرات وصعوبة عملية التحليل تحتم علينا اعتماد نموذج أو حالة للدراسة تُمّكن من إجراء تحليل ومقارنة كافيين لهذا سيتم اعتماد حالة تشغيل النظام عند حمل تبريد ثابت[kW] 10، هذه القيمة تمّ اختيارها على اعتبارها الاستطاعة اللازمة لتكييف شقة سكنية متوسطة المساحة. موقع عمل نظام التبريد الشمسي هو مدينة حلب وسيتم تشغيله واستثماره لغرض التكييف ضمن مجال درجات حرارة المبخر (5^oC -15^oC) خلال أشهر الصيف الستة (من أيار وحتى تشرين الأول) من الساعة الثامنة صباحًا حتى السابعة مساءً. وبالتالي كل القيم والنتائج والمقارنات ستتم على أساس هذه المعطيات (لاحقاً سيتم تغيير هذه القيم ضمن مجال محدد ودراسة تأثير ذلك على أداء النظام).

2-6- عرض النتائج :

سيتم تقديم النتائج على أربع مراحل.

في المرحلة الأولى: سيتم عرض نتائج التغيرات في الشروط المناخية في مدينة حلب.

في المرحلة الثانية: سيتم إجراء العديد من عمليات التشغيل للنموذج المحاكي بهدف مراقبة المتغيرات و تحديد أفضل الشروط لعمل عناصر النظام بصورة فعّالة ومجدية ومستمرة خلال فترة التبريد هذه المتغيرات هي:

- زاوية ميل سطح المجمعات الشمسية عن الأفق.
- معدل تدفق المضخة في دارة المجمعات الشمسية.
- حجم مستودع التخزين الحراري.
- درجة الحرارة الحدية لعنصر التسخين المساعد.
- مساحة المجمعات الشمسية.

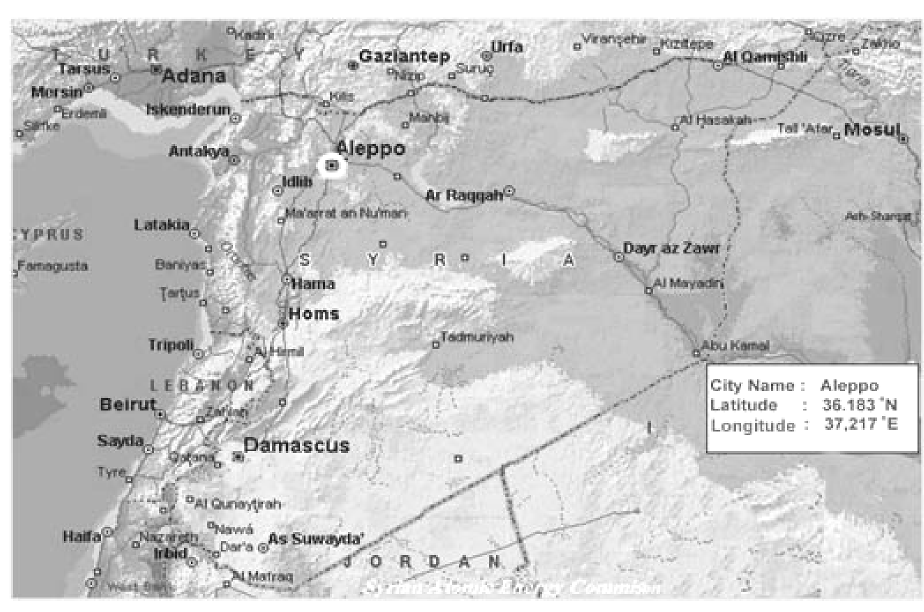
في المرحلة الثالثة: سيتم عرض نتائج محاكاة عمل النظام الشمسي من خلال إجراء تحليل طويل الأمد لأداء المجمّعات الشمسية ونسب التغطية الشمسية وطاقة التسخين المساعد لكل نوع من المجمعات الشمسية المقترحة وذلك بعد تثبيت القيم المثلى لعناصر وظروف تشغيل النظام التي تم تحديدها بالمرحلة الثانية.

في المرحلة الرابعة: سيتم عرض ومناقشة نتائج محاكاة كاملة لعمل دارة التبريد الامتصاصية وتأثير متغيرات عوامل التشغيل المختلفة والأحمال الحرارية على عامل أدائها.

6-2-1- الظروف المناخية والإشعاع الشمسي في مدينة حلب :

Climate and Solar Radiation in Aleppo City

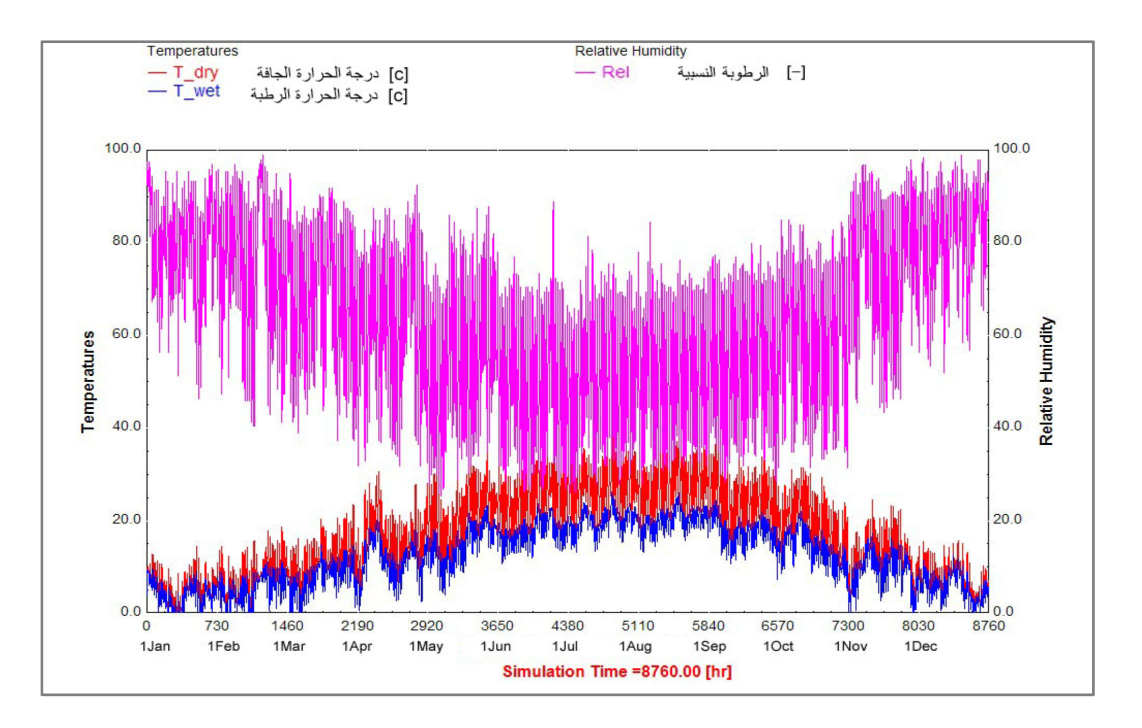
بما أن مصدر الطاقة الحرارية المغذي لنظام التبريد الامتصاصي هو الطاقة الشمسية، يكون من المهم تحديد البيانات المناخية وظروف الإشعاع الشمسي اليومي خلال فترة استثمار النظام. يوضح الشكل(6-1) خريطة سورية وموقع مدينة حلب، حيث زاوية خط العرض هي 36.183^{o} شمالاً، وزاوية خط الطول 37.217^{o} شرقاً.



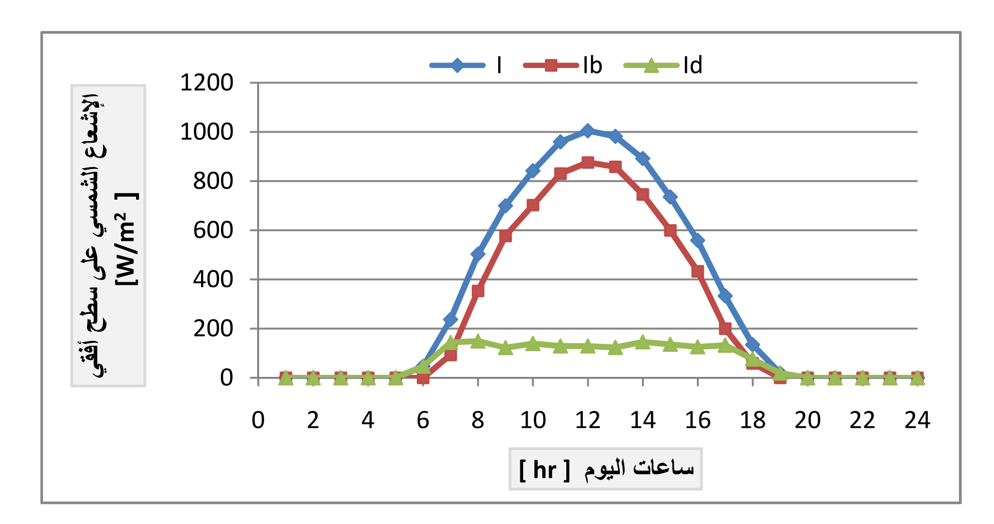
الشكل (6-1) خارطة سورية [4]

يُظهر الشكل (6-2) تغيرات درجة الحرارة الجافة والرطبة والرطوبة النسبية خلال عام. من الواضح أن درجة الحرارة الجافة تصل لـــ ($37\ ^{o}C$) في فترات الصيف، أما الرطوبة النسبية فهي وسطياً (55%)، وتصل كحد أدنى لـــ 30 %، هذه القيم قريبة من القيم التصميمية المعتمدة في نقابة المهندسين السوريين (درجة الحرارة الجافة $40\ ^{o}C$ والرطوبة النسبية 30 %).

يوضح الشكل (6-3) التغيرات الساعية لكلٍ من الإشعاع الشمسي الكلي (I) والإشعاع المباشر(I_b) والإشعاع المنتشر (I_d) على سطح أفقي خلال يوم صيفي نموذجي تم افتراض أنه يوم (23) من تموز حيث الإشعاع الشمسي جيد ولا غيوم في السماء.

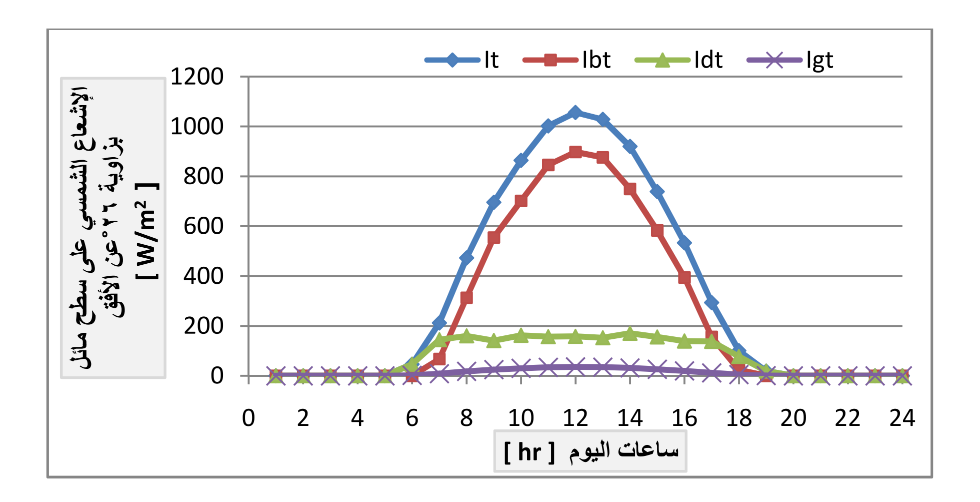


الشكل (6-2) تغيرات درجة الحرارة الجافة والرطبة والرطوبة النسبية في مدينة حلب على مدار عام كامل



الشكل (6-3) التغيرات الساعية لكلٍ من الإشعاع الشمسي الكلي (I) والإشعاع المباشر(I_b) والإشعاع المنتشر (I_d) على سطح أفقي خلال يوم (23) تموز.

بينما تظهر التغيرات الساعية للإشعاع الشمسي الكلي (I_t) والمباشر (I_{bt}) والمنتشر (I_{dt}) والمنعكس (I_{gt}) على السطح المائل بزاوية 26^o خلال يوم (23) تموز بواحدة [W/ m^2] في الشكل (6-4).



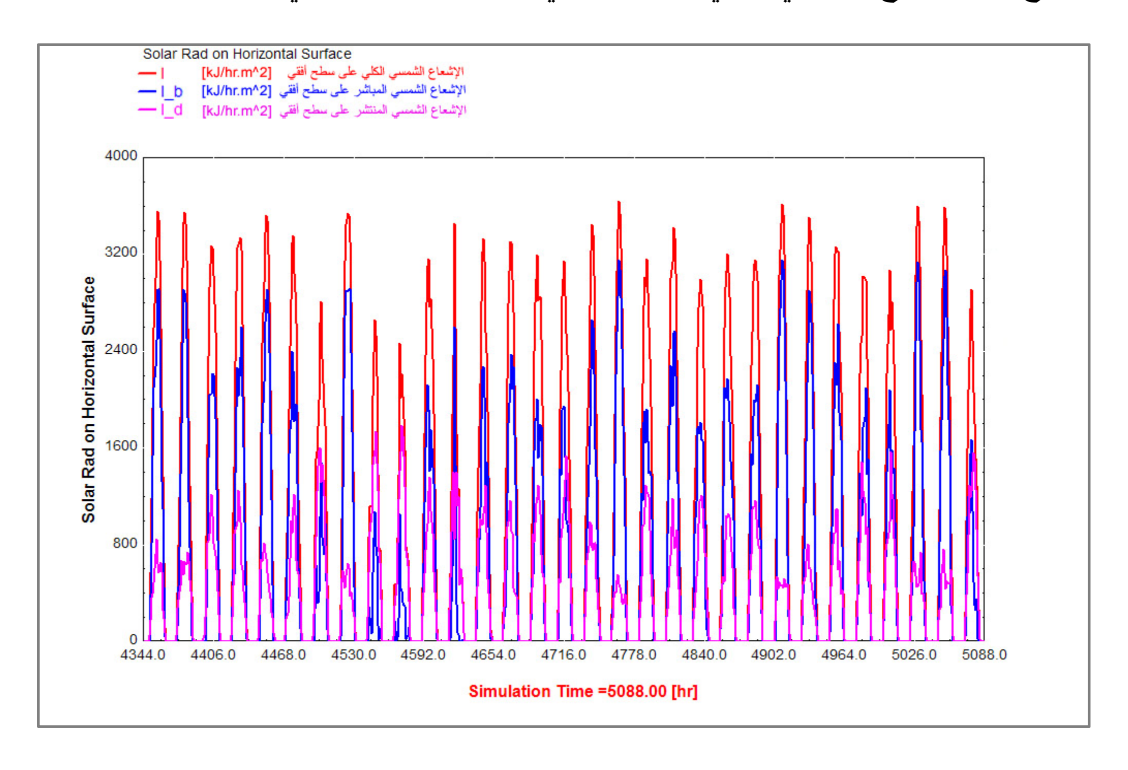
الشكل (4-6) التغيرات الساعية للإشعاع الشمسي الكلي (I_t) والمباشر (I_{bt}) والمنتشر (I_{dt}) والمنعكس(I_{gt}) على السطح المائل بزاوية 26^o خلال يوم موافق لـــ (23) تموز.

تتغير شدة الإشعاع الشمسي الكلي خلال أيام السنة. يوضح الجدول (1-6) تغيرات الإشعاع الشمسي الكلي على سطح مائل بزاوية 26^o لليوم الأول من أشهر فترة التبريد المحددة.

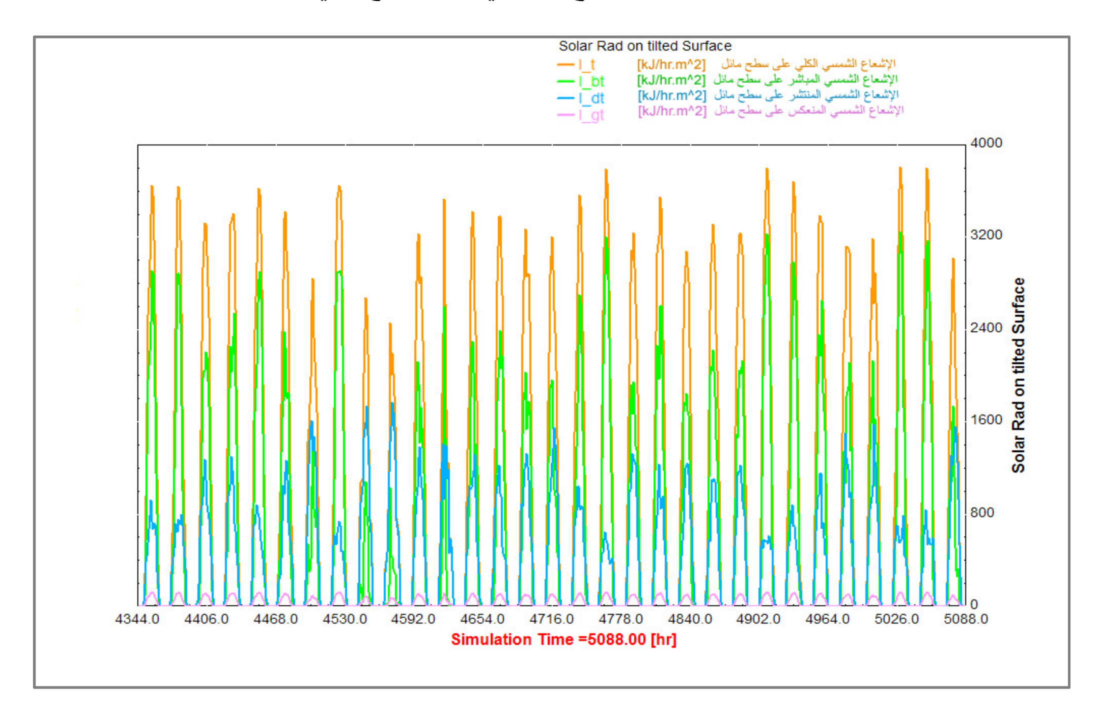
الجدول(1-6) التغيرات الساعية للإشعاع الكلي على سطح مائل (26^0) خلال اليوم الأول من أشهر فترة التبريد

Time [hr]	Solar Total Radiation on tilted surface(26^o) I_t [W/m^2]					
	1 May	1 Jun	1 Jul	1 Aug	1 Sep	1 Oct
5	0.00	22.62	13.79	0.00	0.00	0.00
6	60.28	105.92	85.58	59.65	33.30	0.00
7	244.47	270.76	272.43	238.05	148.64	149.24
8	492.22	479.97	472.70	487.56	402.19	410.21
9	666.50	723.83	669.49	649.44	560.21	586.50
10	782.97	940.71	862.35	782.71	766.47	793.25
11	909.80	1035.19	984.08	870.90	915.02	781.71
12	917.76	1063.18	1011.84	920.88	932.05	907.46
13	924.47	1030.53	981.36	964.16	894.69	907.92
14	853.36	918.36	883.32	879.48	679.31	732.07
15	676.47	744.03	706.87	689.04	609.84	604.97
16	486.67	536.58	477.69	545.90	370.08	331.96
17	256.96	274.61	307.62	256.09	206.69	107.38
18	59.34	85.16	95.44	59.08	32.99	0.00
19	0.00	20.67	9.85	0.00	0.00	0.00

يظهر الشكلان (6-5) و (6-6) التغيرات اليومية للإشعاع الشمسي على سطح أفقي والإشعاع الشمسي على سطح مائل بزاوية 26^{o} خلال شهر تموز على الترتيب، حيث من الواضح أن الإشعاع الشمسي الكلي يصل لحوالي 1000 $[W/m^2]$ في فترات الظهيرة.



الشكل (6-5) التغيرات اليومية للإشعاع الشمسي على سطح أفقي خلال شهر تموز



الشكل (6-6) التغيرات اليومية للإشعاع الشمسي على سطح مائل بزاوية 26^{0} خلال شهر تموز

6-2-2- تحديد القيم المثلى للنظام المقترح واستنتاج الظروف المثلى للتشغيل:

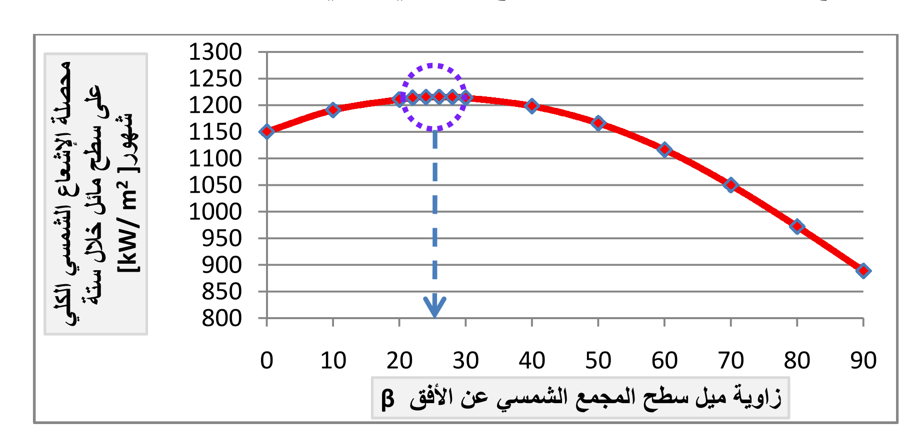
تمت مراقبة تغيرات بعض العوامل والمتغيرات التي تؤثر على أداء النظام وفق الحالة المدروسة من خلال القيام بتشغيل متكرر للنموذج المحاكي بهدف الوصول إلى القيم المثلى لها وتثبيتها كخطوة تمهيدية قبل البدء بمحاكاة طويلة الأمد للنظام ككل (المرحلة الثالثة والرابعة).

أ- زاوية الميل المثلى لسطح المجمع عن الأفق:

Optimal Slope angle of collector surface

يعتبر هذا العامل من المتغيرات المهمة التي تؤثر على أداء المجمعات الشمسية، حيث تؤكد الأبحاث أن توجيه المجمعات الشمسية بشكلٍ أمثل يجلب ربحاً سنوياً من الإشعاع الشمسي يقترب من 30% مقارنةً بحالة وضع المجمعات الشمسية المثبتة أفقياً [27]. إنّ المجمّعات الشمسية يجب أن تتوضّع بشكل تكون فيه كمية الطاقة المستفادة خلال الصيف أعظم ما يمكن، يتحدد هذا التوضّع من خلال زاوية ميل سطح المجمع على الأفق وزاوية سمت السطح الأفقية *Azimuth angle*. بالنسبة لاتجاه السطح فإنه سيكون باتجاه الجنوب أما زاوية الميل المثلى (β_{opt}) على الأفق فإنه سيتم الاعتماد على مؤشر المجموع الإجمالي للإشعاع الشمسي الكلي الوارد على السطح المائل خلال فترة عمل النظام (ستة شهور).

يتبين من المخطط في الشكل (6-7) أنّ الزاوية المثلى لميل سطح المجمعات الشمسية على الأفق وفق الشروط المناخية لمدينة حلب خلال فترة عمل النظام (ستة شهور) هي (26^o) والتي تتوافق مع أكبر قيمة لمحصلة الإشعاع الشمسي الكلي خلال فترة التبريد.



الشكل (6-7) تأثير زاوية ميل سطح المجمع على محصلة الإشعاع الكلي خلال ست شهور

ُقدمت العديد من الأبحاث لتحديد قيم الزاوية المثلى لميل المجمعات الشمسية يومياً وشهرياً وفصلياً وسنوياً، يعتمد معظم هذه الأبحاث على معادلات ونماذج رياضية تربط زاوية الميل المثلى بزاوية خط العرض، المرجع [32] مثلاً اعتمد زاوية الميل المثلى

$\beta_{opt} = \Phi \pm 15$، حيث تضاف القيمة 15 إلى زاوية خط العرض في الشتاء و تطرح في الصيف. اقترح المرجع [35] مثلاً نموذجاً رياضياً وصل فيه وفق الظروف المناخية السورية إلى أن زاوية الميل المثلى السنوية هي 32.95^{o} لمدينة حلب و 30.56^{o} لمدينة دمشق.

ب- معدل التدفق في دارة المجمعات الشمسية:

Pump flow rate of solar collectors cycle.

من الممكن إيجاد قيمة معدل التدفق من خلال معرفة استطاعة المولد الحرارية والفرق في درجات الحرارة التصميمية للمائع في المولد، ومن ثم حساب مساحة المجمعات الشمسية من خلال المردود الحراري للمجمع الشمسي والطاقة المفيدة المطلوبة عند شهر وساعة تصميمية معينة بحيث تكون المجمعات الشمسية بهذه المساحة وهذا التدفق قادرة على تأمين $\dot{Q}_u$ أكبر من الاستطاعة الحرارية المطلوبة في المولد لتحرير وسيط التبريد وتأمين التأثير التبريدي المطلوب.

كذلك نظراً لأن معظم نتائج الأبحاث تعطي فرق في درجات الحرارة عند مدخل ومخرج المولد (5~8 ^{o}C) من الممكن الافتراض أن معدل التدفق في الخزان $\dot{m}_{tank} =$ $0.4\ [\frac{kg}{s}]$ (حيث تم حسابها ببساطة من معادلة التوازن الحراري على طرفي المولد).

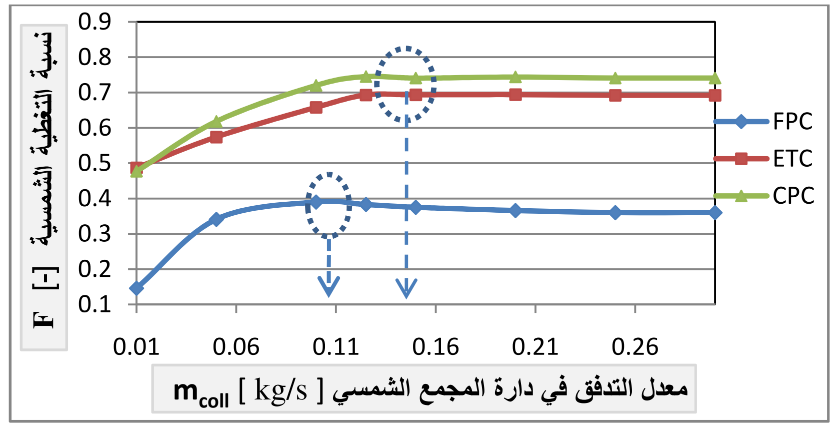
ولكن ونظراً لاختلاف المردود الحراري بين أنواع المجمعات الشمسية والحاجة إلى إجراء مقارنة بين هذه القيم تم الافتراض أن مساحة المجمعات الشمسية هي A_{coll}=30m^{2} للأنواع الثلاثة وهي قيمة تضمن تأمين $\dot{Q}_u$ المطلوبة مع أسوأ مردود حراري للمجمعات الشمسية وأسوأ ظروف إشعاع شمسي، مع ملاحظة أن الغاية هنا هو مراقبة ومقارنة السلوك الحراري (نسبة التغطية الشمسية) والذي لن يتغير مع تغير المساحة.

من أجل تحديد القيمة الأفضل لمعدل التدفق في دارة المجمعات الشمسية لابد من إعطاء قيم ثابتة لعدد من المتغيرات والمدخلات لأنواع المجمعات الثلاثة، هذه الفرضيات هي كالتالي:

- مساحة أنواع المجمعات الشمسية الثلاثة A_{coll}=30m^{2}.
- زاوية ميل سطح المجمعات $\beta_{opt} = 26^{0}$.
- حجم مستودع التخزين الحراري V=0.8m^{3}، معدل التدفق في دارة الخزان $\dot{m}_{tank} = 0.4\ [\frac{kg}{s}]$.
- درجة الحرارة الحدية للسخان المساعد T_{set}=85 ^{o}C، استطاعة السخان الأعظمية $Q_{h.max}$= 8 [kW] (تم افتراض هذه القيمة كونها تستطيع تأمين استطاعة حرارية ودرجة حرارة في المولد كافية لتحرير وسيط التبريد عند أسوأ ظروف للإشعاع الشمسي).

- حمل التبريد $\dot{Q}_e$=10 [kW]، درجة حرارة المبخر T_{10}= 6 ^{o}C ، تركيز المحلول الغني X_S=60%، تركيز المحلول الفقير X_w=55%.

يوضح المخطط بالشكل (6-8) تأثير معدل تدفق الماء في دارة المجمع الشمسي على نسبة التغطية الشمسية $F = \frac{\dot{Q}_g - \dot{Q}_{aux}}{\dot{Q}_g}$. يتضح أنه مع القيم الصغيرة لمعدل التدفق $\dot{m}_{coll}$ تكون مساهمة الطاقة الحرارية الشمسية منخفضة وتزداد هذه المساهمة مع ازدياد معدل التدفق حتى الوصول لقيمة مثلى. بعدها يؤدي زيادة معدل التدفق إلى انخفاض ضئيل نسبياً في الطاقة المستفادة من المجمعات الشمسية وبالتالي نسبة التغطية الشمسية كما في الشكل(6-8):



الشكل(6-8) تأثير معدل التدفق في دارة المجمعات الشمسية على نسبة التغطية الشمسية

في المرحلة الأولى من زيادة معدل التدفق في دارة المجمعات نلاحظ أن نسبة التغطية الشمسية تزداد بشكل كبير وذلك لأن كمية الوسيط العامل المتدفق عبر دارة المجمعات لا تكون كافية لحمل مجمل الطاقة الحرارية الملتقطة من المجمعات الشمسية ومع ازدياد هذا التدفق تزداد نسبة التغطية الشمسية، لكن هذه الزيادة تكون محدودة حيث سرعان ما يصبح التدفق قادراً على حمل معظم الطاقة الحرارة الملتقطة ويصبح من غير المجدي حرارياً الزيادة في هذا التدفق بل على العكس سوف يترتب عليه تشغيل غير مبرر للمضخة باستطاعة أعلى من المطلوب، بالتالي القيمة المثلى لمعدل التدفق والتي تتوافق مع أكبر مساهمة للطاقة الشمسية دون تشغيل زائد للمضخة هي:

- في حالة مجمعات السطح المستوي $\dot{m}_{coll(opt)}$ = 0.1 [kg/s] .
- في حالة المجمعات الأنبوبية المفرغة $\dot{m}_{coll(opt)}$ = 0.15 [kg/s] .
- في حالة مجمعات القطع المكافئ المركبة: $\dot{m}_{coll(opt)}$ = 0.15 [kg/s] .

ويعود سبب التشابه الكبير بين المجمعات الأنبوبية والقطعية من حيث نسبة التغطية الشمسية إلى تقارب قيم المردود الحراري لكليهما.

أما عند دراسة تأثير تغير معدل التدفق في دارة الخزان $\dot{m}_{tank}$ على نسبة التغطية الشمسية من أجل المجمعات الثلاث فقد حصلنا على نتائج متشابهة حيث بلغت القيمة المثلى

لمعدل التدفق في دارة الخزان $\dot{m}_{tank(opt)} = 0.4$ [kg/s] للأنواع الثلاثة والتي تتوافق مع أعلى نسب تغطية شمسية. إن اختيار هذه القيم لمعدلات التدفق يحقق فائدتين الأولى تفادي عدم القدرة على تأمين نسبة تغطية شمسية كافية عند معدلات تدفق متدنية والثانية تجنب الزيادة في الطاقة الكهربائية المستهلكة في تشغيل المضخات عند معدلات تدفق كبيرة.

جـ – حجم مستودع التخزين الحراري: *Storage tank size.*

إن تحديد الحجم المناسب لمستودع التخزين الحراري يلعب دوراً مهماً في تحسين عمل النظام والوصول إلى النظام الأمثل حرارياً واقتصادياً (أصغر حجم للخزان يزود النظام بطاقة تخزين كافية وأقل اعتماد على السخّان المساعد الكهربائي).

من أجل دراسة هذا العامل تم تثبيت القيم التالية:

- مساحة أنواع المجمعات الثلاثة $A_{coll}=30m^2$.
- زاوية ميل سطح المجمعات $\beta_{opt} = 26^0$.
- معدل التدفق في دارة المجمعات: بالنسبة لـ FPC $\dot{m}_{coll} = 0.1$ [kg/s]، والقيمة $\dot{m}_{coll} = 0.15$ [kg/s]، للمجمعات CPC و ETC .
- معدل التدفق في دارة الخزان $\dot{m}_{tank} = 0.4$ [kg/s].
- درجة الحرارة الحدية للسخان المساعد $T_{set}=85\ ^oC$، استطاعة السخان الأعظمية $Q_{h.max}= 8$ [kW].
- حمل التبريد $\dot{Q}_e=10$ [kW]، درجة حرارة المبخر $T_{10}=6\ ^oC$، تركيز المحلول الغني $X_S=60\%$، تركيز المحلول الفقير $X_w=55\%$.

تمت دراسة تغيرات طاقة التسخين المساعد المطلوبة من أجل قيم مختلفة لحجم الخزان لأنواع المجمعات الشمسية المقترحة (CPC ،ETC ،FPC) واعتماد الحجم المثالي على أساس احتياج النظام لاستطاعة التسخين المساعد الأقل.

تم إيجاد طاقة التسخين المساعد الوسطي اليومي (الاستطاعة الوسطية اليومية للتسخين المساعد) من المعادلة التالية:

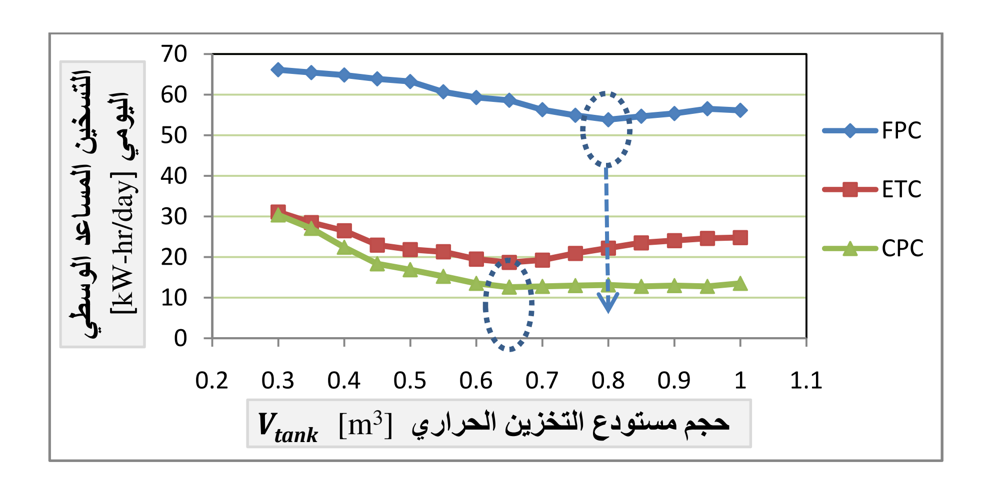
$$\int_{2880}^{7272} \frac{\dot{Q}_{aux}.11}{183}$$

حيث 2880، 7272 هما ترتيب الساعة الموافقة للأول من أيار والموافقة للأول من تشرين أول على الترتيب، 11 عدد ساعات العمل اليومية، 183 عدد أيام فترة التشغيل.

يوضح الشكل (6-9) نتائج دراسة الحجم الأمثل لمستودع التخزين الحراري وهي:

- بالنسبة لمجمعات السطح المستوي FPC الحجم المثالي $0.8\ m^3$.

– بالنسبة للمجمعات الأنبوبية المفرغة ETC الحجم المثالي $0.65\ m^3$.
– بالنسبة لمجمعات القطع المكافئ المركزة الثابتة CPC الحجم المثالي $0.65\ m^3$.



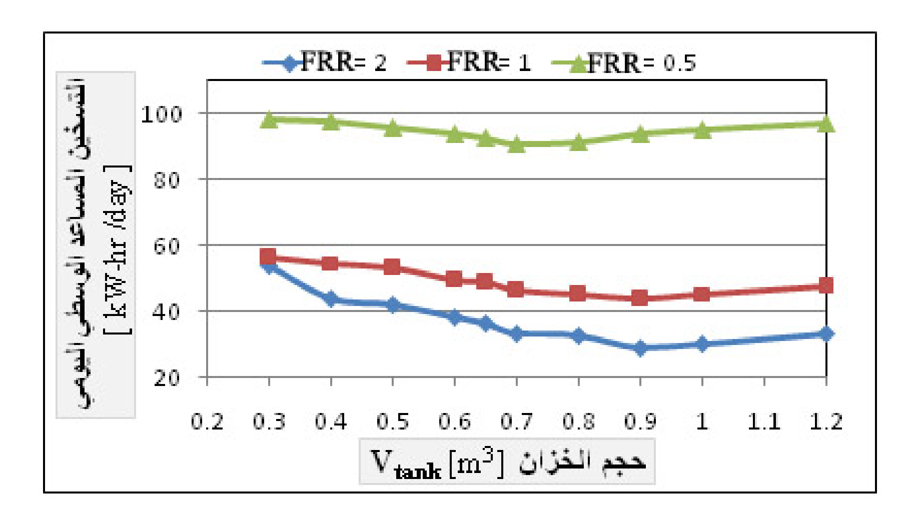
الشكل (6-9) تغيرات الاستطاعة الوسطية اليومية للتسخين المساعد عند أحجام مختلفة لمستودع التخزين الحراري

مع الحجم الكبير للخزان تنخفض درجة الحرارة الوسطية للماء، حيث تصبح طاقة التسخين المساعد كبيرة لكي تؤمن الطاقة الحرارية المطلوبة لحمل التبريد الثابت في حالتنا، أما مع الحجم الصغير للخزان فإن درجة حرارة الماء بالخزان تكون عالية لكن الكمية القليلة للماء في الخزان تقلل دور الخزان في تزويد الطاقة الحرارية وكأن الخزان غير موجود نتيجة لهذا يعمل السخان بشكل أكبر لكي يزود المولد بالطاقة الحرارية اللازمة.

لتحديد تأثير معدل التدفق في دارة الخزان(بين الخزان والمولد) $\dot{m}_{tank}$، تمت دراسة تأثير حجم الخزان على التسخين المساعد الوسطي اليومي في حالة المجمعات المسطحة كمثال للدراسة من أجل ثلاث قيم للنسبة FRR(Flow Rate Ratio) التي تمثل نسبة معدل التدفق في دارة المجمعات إلى معدل التدفق في دارة الخزان $FRR = \frac{\dot{m}_{coll}}{\dot{m}_{tank}}$، ولإجراء الدراسة تم تثبيت معدل التدفق في دارة المجمعات الشمسية عند القيم المثلى لها وتغيير معدل التدفق في دارة الخزان وفق النسب الثلاث (FRR=0.5، FRR=1، FRR=2) على التوالي ومراقبة تأثير ذلك على الاستطاعة الوسطية اليومية للتسخين المساعد.

يوضح الشكل(6-10) أنه من أجل قيمة منخفضة للنسبة FRR (FRR=0.5) يكون التسخين المساعد كبيراً نسبياً لكي يساعد في رفع درجة حرارة الماء المغذي للمولد أما عند القيم الكبيرة للنسبةFRR (FRR=2) فإن مقدار التسخين يكون منخفضاً لأن دارة

المجمعات الشمسية تؤمن درجة حرارة ماء ساخنة كافية، ويلاحظ أن القيمة المثلى لحجم الخزان تنزاح قليلاً باتجاه اليسار مع تناقص النسبة FRR.



الشكل(6-10) يوضح تأثير نسبة معدلات التدفق بين دارة المجمعات والخزان على القيمة المثالية لحجم الخزان (مجمعات شمسية مسطحة)

د – درجة الحرارة الحدية للسخان المساعد :

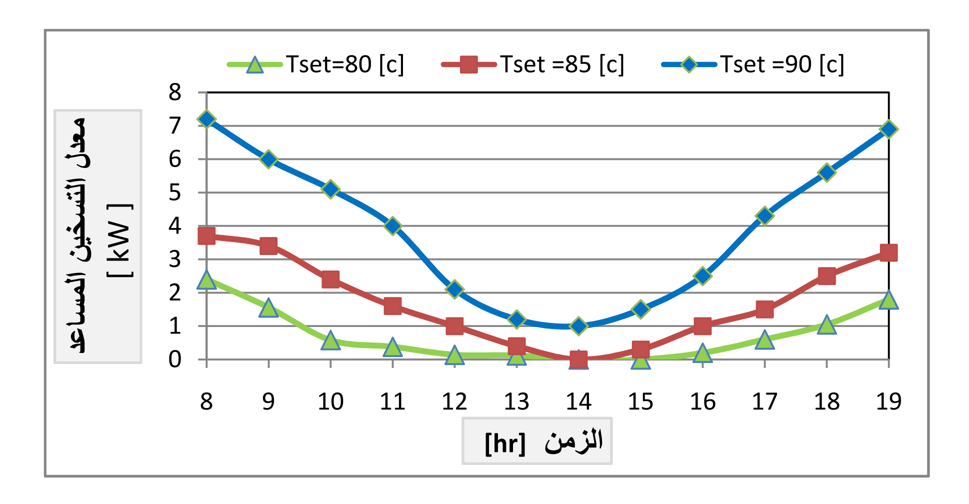
The set point temperature of auxiliary heater

إن درجة الحرارة الحدية (T_{set}) تسمح للسخّان المساعد بالعمل فقط عندما تصبح درجة حرارة المائع الواصلة للحمل (T_{11}) أقل من القيمة الحدية المحددة، لهذا فإن تحديد القيمة الحدية بصورة مثالية سيؤثر على أداء دارة التبريد والنظام ككل من الجانب الحراري من خلال نسبة التغطية الشمسية ومن الجانب الاقتصادي من خلال مقدار الطاقة الكهربائية المستهلكة في السخان.

من أجل تحديد هذه القيمة تم تشغيل النموذج المحاكي بصورة متكررة من أجل ثلاث قيم لدرجات الحرارة الحدية لعنصر التسخين المساعد المركب في مستودع التخزين الحراري: T_{set} =80 °C ،T_{set} =85 °C ،T_{set} = 90 °C ومراقبة تغيرات معدل التسخين المساعد $\dot{Q}_{aux}$ خلال يوم واحد (23 تموز) مع تثبيت المدخلات والقيم ذاتها الواردة في الفقرة السابقة.

من المهم الملاحظة أنه جرى التأكد من أن هذه القيم هي ضمن المجال القادر على تشغيل واستثمار الدارة الامتصاصية (أي تحقق الشرط الأساسي في تحرير وسيط التبريد في المولد $T_{set} > T_b$).

يوضح الشكل (6-11) تغيرات معدل التسخين المساعد المطلوب يومياً بشكل وسطي من أجل القيم الحدية نفسها لدرجات الحرارة.



الشكل (6-11) تغيرات معدل التسخين المساعد خلال اليوم من أجل ثلاث قيم لدرجة الحرارة الحدية (مع مجمعات FPC بمساحة $30m^2$)

يتضح من النتائج أن معدل التسخين المساعد يزداد بازدياد الدرجة الحدية، ويكون معدل التسخين المساعد أقل بكثير في حالة T_{set} =80 ^oC مقارنة بحالة ضبط درجة الحرارة الحدية على T_{set} =90 ^oC.

يمكن اختيار درجة الحرارة الحدية عند القيمة $(T_{set})_{opt} = 85\ °C$ وهي الدرجة التي تعطي قيمة وسطية لدرجة الحرارة الحدية، وقد تم اختيارها بشكل وسطي تقريبي عند هذه القيمة **لسببين** الأول تفادي القيمة الكبيرة للتسخين المساعد ، والثانية عدم ملاحظة تغير كبير في معامل الأداء عند ارتفاع درجة حرارة المولد. مع ملاحظة أنه جرى التأكد من أن هذه القيمة هي ضمن المجال القادر على تشغيل واستثمار الدارة الامتصاصية (أي تحقق الشرط الأساسي في تحرير وسيط التبريد في المولد $T_{set} > T_b$).

من المهم الذكر أنه من أجل تحديد دقيق لهذا المتغير لابد من إجراء دراسة اقتصادية لكامل النظام تأخذ بعين الاعتبار سعر كيلو الواط الساعي من الطاقة الكهربائية والتكاليف الثابتة والمتحولة المترتبة على المجمعات الشمسية والتجهيزات وتركيبها وتشغيلها وصيانتها.

هـ - مساحة المجمعات الشمسية : *Solar Collector area*

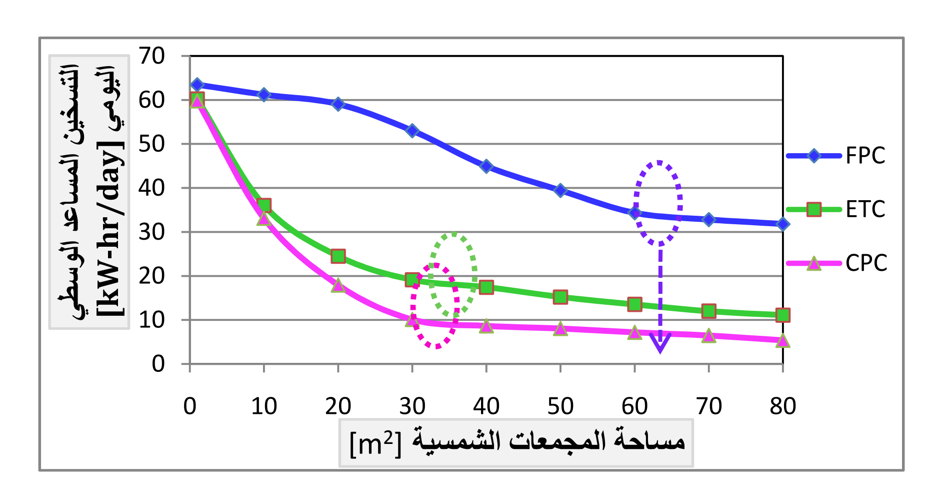
إن القيمة المثلى لمساحة المجمعات الشمسية من أجل حمل تبريد معين تتحدد من خلال ما تقابله من أعلى قيمة لنسبة التغطية الشمسية والموافقة لأقل طاقة تسخين مساعد وبالتالي أقل كلفة تشغيلية ممكنة.

من أجل حالتنا المدروسة حيث حمل التبريد ودرجة حرارة المبخر ثابتة. تم تغيير مساحة المجمعات الشمسية لكل نوع مع تثبيت القيم التالية:

- زاوية ميل سطح المجمعات $\beta_{opt} = 26^0$.
- معدل التدفق في دارة المجمعات $\dot{m}_{coll} = 0.1\ [\frac{kg}{s}]$ بالنسبة للـــFPC والقيمة $\dot{m}_{coll} = 0.15\ [\frac{kg}{s}]$ بالنسبة لـــ ETC و CPC.
- حجم مستودع التخزين الحراري هي $0.8\ m^3$، $0.65\ m^3$، $0.65\ m^3$ لأنواع المجمعات الشمسية FPC، ETC، CPC على الترتيب .
- معدل التدفق في دارة الخزان $\dot{m}_{tank} = 0.4\ [\frac{kg}{s}]$.
- درجة الحرارة الحدية للسخان $T_{set}=85\ ^oC$ ، استطاعة السخان $Q_{h.max}= 8$ [kW].
- حمل التبريد $\dot{Q}_e=10$ [kW]، درجة حرارة المبخر $T_{10}=6\ ^oC$، تركيز المحلول الغني $X_S=60\%$، تركيز المحلول الفقير $X_w=55\%$.

يوضح الشكل (6-12) أنه لدى زيادة مساحة المجمّعات الشمسية للأنواع الثلاثة فإن مقدار التسخين المساعد الوسطي يومياً يتناقص بشكل كبير، لكن مع زيادة مساحة المجمعات يصبح معدل التناقص في التسخين المساعد اليومي ضئيلاً نسبياً بحيث لا تقابل الزيادة في المساحة بعد حد معين استفادة كبيرة في مجال تخفيض التسخين المساعد المطلوب ورفع قيم نسبة التغطية الشمسية، هذه القيم الحدية يمكن اعتبارها قيم مثلى، بالتالي يمكن من المخطط تحديد القيم المثلى:

- بالنسبة لمجمعات FPC القيمة المثالية للمساحة $65\ m^2$.
- بالنسبة لمجمعات ETC القيمة المثالية للمساحة $35\ m^2$.
- بالنسبة لمجمعات CPC القيمة المثالية للمساحة ضمن المجال $32\ m^2$.



الشكل (6-12) تأثير مساحة المجمعات الشمسية على التسخين المساعد الوسطي المطلوب يومياً خلال فترة التبريد من أجل الحالة المدروسة

يمكن تثبيت القيم المثالية التالية لعناصر النظام ومتغيراته وفق الحالة المدروسة:

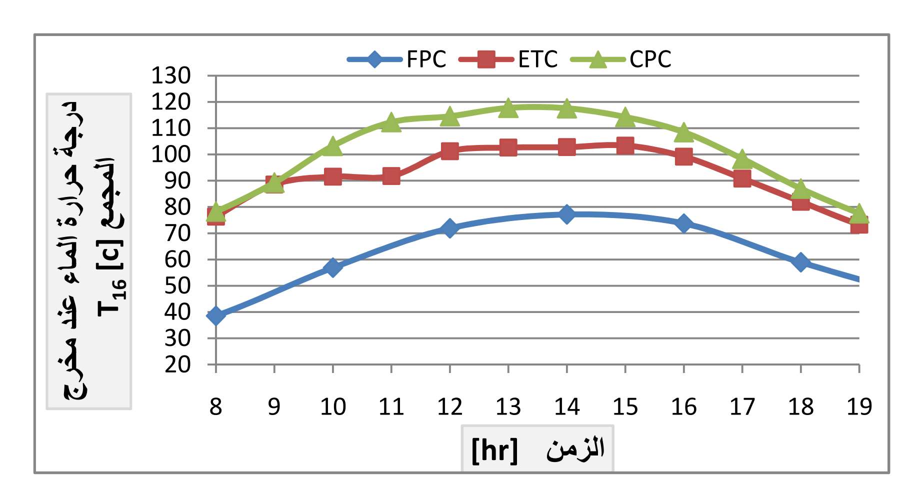
- زاوية الميل المثالية لسطح المجمعات الشمسية $\beta_{opt} = 26^0$.
- معدل التدفق في دارة المجمعات $\dot{m}_{coll} = 0.1\ [\frac{kg}{s}]$ بالنسبة للـ FPC والقيمة $\dot{m}_{coll} = 0.15\ [\frac{kg}{s}]$ بالنسبة لـ ETC و CPC.
- حجم مستودع التخزين الحراري هي $0.8 m^3$، $0.65\ m^3$، $0.65\ m^3$ لأنواع المجمعات الشمسية FPC، ETC، CPC على الترتيب .
- معدل التدفق في دارة الخزان $\dot{m}_{tank} = 0.4\ [\frac{kg}{s}]$.
- درجة الحرارة الحدية للسخان T_{set}=85 ^{0}C.
- مساحة المجمعات الشمسية هي $65\ m^2$، $35\ ^2$، $32\ m^2$ بالنسبة لمجمعات FPC ومجمعات ETC ومجمعات CPC على الترتيب.

3-2-6 محاكاة عمل نظام المجمّعات الشمسية والخزان الحراري :

سيتم عرض نتائج محاكاة عمل المجمعات الشمسية والخزان الحراري والسخان المساعد بعد تثبيت القيم المثلى للحالة المدروسة التي نوقشت في المرحلة الثانية وذلك خلال يوم واحد من فترة التبريد تم افتراضه يوم (23) من تموز .

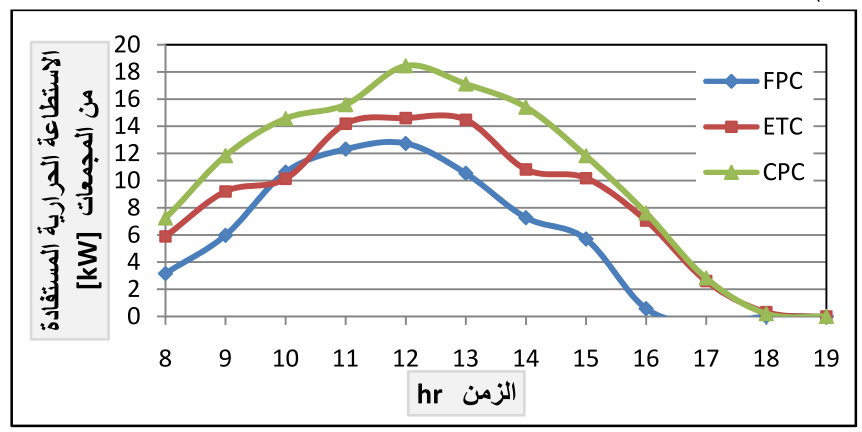
أ- نظام المجمعات الشمسية:

يوضح المخطط في الشكل (6-13) تغيرات درجة حرارة المائع عند خروجه من المجمعات الشمسية T_{16} لكل نوع من الأنواع المقترحة خلال ساعات اليوم.



الشكل(6-13) تغيرات درجة حرارة الماء عند خروجه من المجمعات الشمسية خلال ساعات يوم (23) تموز

تبدأ درجة حرارة الماء عند خروجها من المجمعات الشمسية بالارتفاع مع الساعات الأولى لشروق الشمس حتى تصل لقيم أعظمية عند فترة الظهيرة، تصل في حالتنا المدروسة بالنسبة لمجمعات القطع المكافئ مثلاً إلى $119\ ^0C$ وتصل إلى $104\ ^0C$ بالنسبة للمجمعات الأنبوبية وبالتالي من الضروري أن يكون الماء في دارة المجمعات الشمسية الأنبوبية أو القطعية المركزة مضغوطاً بحيث يمنع تبخر المائع العامل (الماء)، حيث تكون الطاقة المستفادة من المجمّعات الشمسية أعظمية خلال فترات الظهيرة أيضاً كما هو موضح في الشكل (6-14).

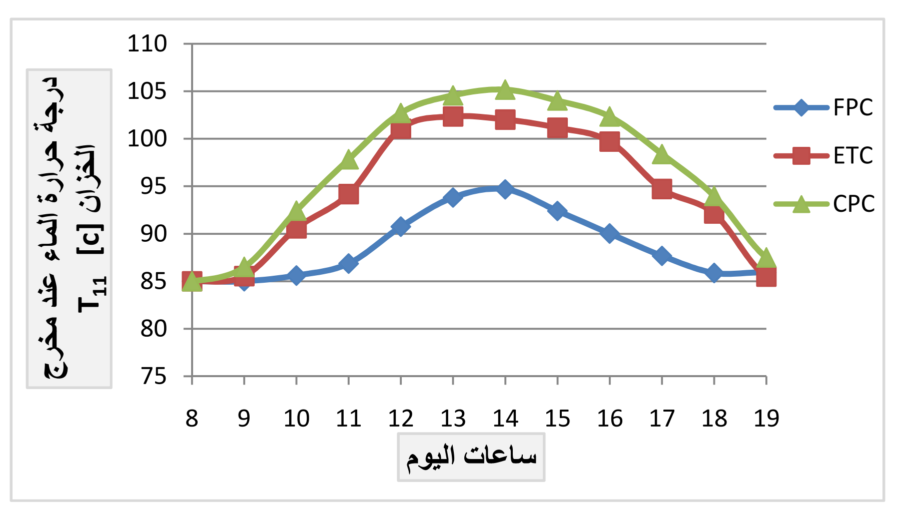


الشكل (6-14) تغيرات الاستطاعة الحرارية المستفادة من المجمعات الشمسية الثلاثة للحالة المدروسة خلال ساعات يوم (23) تموز.

ب- نظام التخزين الحراري والتسخين المساعد:

إن أهم وظيفة لمستودع التخزين الحراري هي تأمين طاقة حرارية مستقرة للحمل عند درجة حرارة وحمل مناسبين.

يوضح المخطط في الشكل (6-15) تغيرات درجة حرارة الماء عند مخرج مستودع التخزين الحراري T_{11}، من أجل أنواع المجمعات الشمسية الثلاثة ومن أجل القيم المثلى للحالة المدروسة **نلاحظ** أن درجة الحرارة T_{11} لا تنخفض عن قيمة $85\ [^0C]$ بسبب تشغيل السخان المساعد عند هذه القيمة الحدية عندما لا يستطيع المجمع الشمسي تأمينها أما في أوقات الظهيرة فتصل درجات الحرارة إلى $105\ [^0C]$ وبالتالي من الضروري أن يكون الخزان الحراري مضغوطاً لتجنب تشكل بخار الماء وخاصة في حالتي استخدام المجمعات الأنبوبية المفرغة و القطعية المركزة.

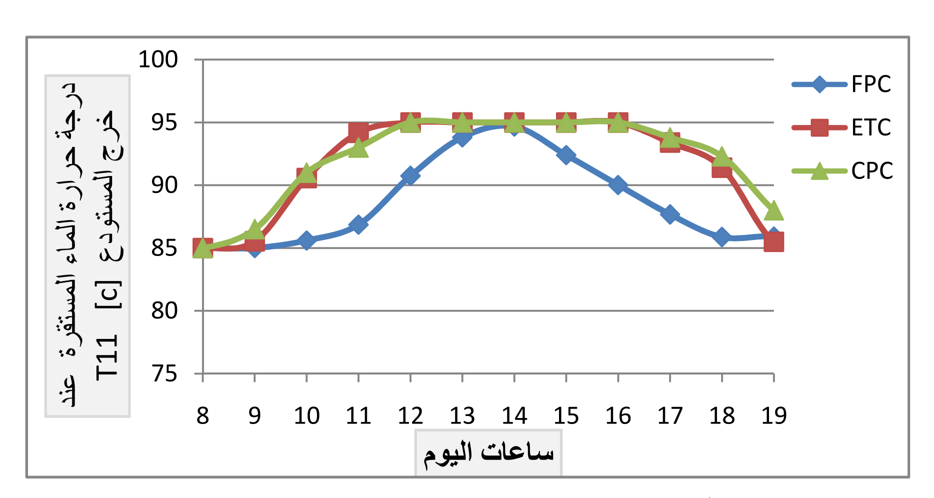


الشكل (6-15) تغيرات درجة حرارة خرج مستودع التخزين الحراري خلال اليوم الموافق (23) تموز من أجل أنواع المجمعات الشمسية الثلاثة.

طالما أن فترات الظهيرة تشهد ارتفاع في درجات الحرارة أعلى من القيمة المقبولة والمناسبة لدرجة حرارة المولد عند تشغيل واستثمار الدارة الامتصاصية بمرحلة واحدة وهي في حدود 90 ^oC، وما يترتب على هذا الارتفاع في درجة الحرارة من ازدياد نسبة الملح في المحلول الملحي واحتمالات التبلور. لهذا تصبح قيم درجات الحرارة في فترات الظهيرة غير مقبولة على الإطلاق ، لهذا تم وضع آلية أو نظام للتحكم بهذه القيمة بحيث تصبح الطاقة الحرارة المدخلة للمولد مستقرة من حيث الكم والسوية وبشكل يضمن معامل أداء حراري جيد للدارة الامتصاصية واحتمال أقل لتبلور المحلول.

هناك أكثر من طريقة لتأمين درجة حرارة مستقرة عند مدخل المولد، ولكن الطريقة التي تم اعتمادها هو إضافة حساسات عند مخرج المجمع الشمسي ومخرج الخزان و ربطها بعنصر تحكم وربط هذا الأخير بالمضخة، بحيث تتوقف المضخة عن العمل عند تجاوز الفرق في درجات الحرارة قيمة معينة.

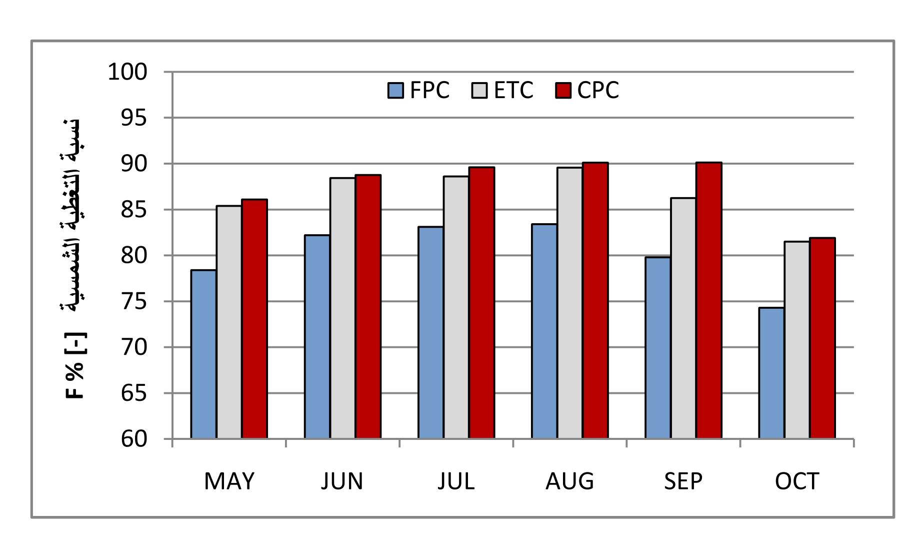
يوضح المخطط (6-16) تأثير وفعالية دارة التحكم في تغيرات درجة حرارة الماء عند مخرج الخزان، تم ضبط الحساسات وضبط القيمة الحدية لعنصر التحكم بحيث لا يتجاوز الفرق في درجات الحرارة بين خرج الخزان ودرجة الحرارة المرجعية عشر درجات (على سبيل المثال). بهذا أصبح بالإمكان التحكم بكمية ودرجة حرارة الماء الساخن المغذي للمولد وبالتالي الحفاظ على استقرار الدارة وتشغيلها ضمن المجال الذي يضمن تحرير وسيط التبريد من المولد ويكفل عدم ارتفاع تركيز الملح في المحلول إلى الحدود المسببة للتبلور.



الشكل (6-16) تغيرات درجة الحرارة المستقرة عند خرج مستودع التخزين الحراري خلال اليوم الموافق (23) تموز من أجل أنواع المجمعات الشمسية الثلاثة.

ُتظهر ملاحظة النتائج في المخططين (6-11) و (6-14) أن الأوقات التي يتوفر فيها الإشعاع الشمسي والتي تزداد فيها الحاجة إلى التبريد أو التكييف يكون معها معدل التسخين المساعد المطلوب أقل ما يمكن أي النتائج تؤكد أن النظام في حالة توافق تام مع حالة الطقس.

يوضح المخطط (6-17) تغيرات نسبة التغطية الشمسية خلال شهور فترة التبريد بالنسبة للحالة المدروسة وذلك بعد تثبيت القيم المثلى في كلٍّ من دارة المجمعات الشمسية ودارة الخزان ودارة التبريد الامتصاصية.



الشكل (6-17) تغيرات نسبة التغطية الشمسية خلال أشهر التبريد الستة للحالة المدروسة بعد تثبيت القيم المثالية لأنواع المجمعات الشمسية الثلاثة.

4-2-6 محاكاة دارة التبريد الامتصاصية:

تم استخدام برنامج TRNSYS وتطويره من أجل نمذجة عنصر الدارة الامتصاصية Type 210 بلغة الفورتران وإضافته إلى مكتبة البرنامج الأساسية كما تمت برمجة تابع فرعي*Subroutine* يحسب الخواص الترموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم–ماء غير الموجودة في مكتبة البرنامج الأساسية وتم ربط هذا العناصر ببعضها. يوضح الشكل(5-2) النتائج الحسابية المستخرجة من عنصر الدارة الامتصاصية.

سنقوم في هذا الجزء بدراسة حساسية النظام من خلال تحليل تأثير عوامل التشغيل المختلفة على أداء دارة التبريد الامتصاصية وذلك اعتماداً على النتائج الحسابية للنموذج المحاكي للدارة الذي تمت برمجته وإضافته إلى مكتبة برنامج TRNSYS، وإجراء مقارنة بين هذه النتائج و نتائج تجريبية معتمدة وتحديد إمكانية الاعتماد على عنصر الدارة الامتصاصية (Type 210) في الحسابات التصميمية والحرارية لأنظمة التبريد الامتصاصية.

ضمن الفرضيات الأساسية المعتمدة في التحليل الترموديناميكي سنحدد القيم المدخلة التالية **كمثال حسابي** بهدف عرض النتائج الحسابية للنموذج المحاكي:

- استطاعة التبريد المطلوبة: $\dot{Q}_e$=10 [kW]
- درجة حرارة المبخر: T_{10}=6 [^oC]
- درجة حرارة المولد: T_4=90 [^oC]
- تركيز المحلول الغني: X_S=60 %
- تركيز المحلول الفقير: X_w=55 %
- الناقلية الحرارية الإجمالية للمبادل الحراري (الموفر): U.A =150 [W/K]

يظهر الجدولان (6-2) و (6-3) النتائج الحسابية لنقاط الدارة المختلفة وعناصرها اعتماداً على عنصر الدارة الامتصاصية المبرمج على TRNSYS :

الجدول(6-2) النتائج الحسابية للخواص الترموديناميكية في كل نقاط الدارة الامتصاصية

Point	*T* [˚C]	*h [kJ/kg]*	*P [kPa]*	*X [%LiBr]*	$\dot{m}$ [$\frac{kg}{s}$]	*Remarks*
1	34.84	82.99	0.935369	55	0.051667	Saturated liquid
2	34.84	82.997	9.657128	55	0.051667	
3	65.80	145.096	9.657128	55	0.051667	
4	90	212.205	9.657128	60	0.047361	
5	45.65	144.46	9.657128	60	0.047361	
6	53.65	144.46	0.935369	60	0.047361	

7	86	2667.97	9.657128	0	0.004306	Superheated Steam
8	-	188.986	9.657128	0	0.004306	Sat liquid water
9	6	188.986	0.935369	0	0.004306	
10	6	2511.55	0.935369	0	0.004306	Saturated vapor

الجدول(6-3) النتائج الحسابية لمعامل الأداء والأحمال الحرارية لمكونات الدارة الامتصاصية

معامل الأداء *Coefficient of Performance*	*COP*	0.7122 [-]
كمية الحرارة المقدمة للمولد *Heat input to the generator*	$\dot{Q}_g$	14040.86 [*W*]
كمية الحرارة المسحوبة في المكثف *Condenser heat, rejected to the environment*	$\dot{Q}_C$	10673.48 [*W*]
كمية الحرارة المسحوبة في الماص *Absorber heat, rejected to the environment*	$\dot{Q}_a$	13367.75 [*W*]
استطاعة التبريد *Capacity (evaporator output power)*	$\dot{Q}_e$	10000 [*W*]
عمل المضخة *Pump work input*	$\dot{W}$	0.3725 [*W*]
كمية الحرارة في المبادل الحراري للمحلول *Heat Exchanger Power*	$\dot{Q}_{shx}$	3208.43 [*W*]
فعالية المبادل الحراري للمحلول *Effectiveness of Heat Exchanger*	ε_{shx}	0.659 [-]

من أجل التأكد من عدم مخالفة المنطق الأساسي في تصميم الدارة الامتصاصية والمعتمد على درجات الحرارة سنقوم بالحسابات التالية:

اعتماداً على مخطط التوازن (الملحق-ب2) من أجل درجة حرارة المبخر $T_{10}=6[^oC]$ ، نجد ضغط المبخر (الضغط المنخفض بالدارة) $P_e = 0,89\ [kPa]$ ودرجة حرارة الوعاء الماص 36^oC ويكون التركيز الفقير للمحلول % 55، عند درجة حرارة التكثيف 36^oC يكون ضغط التكثيف والضغط المرتفع بالدارة $P_c = 9,595\ [kPa]$، أما تركيز المحلول الغني ومن المخطط يكون 60% ، درجة حرارة المولد $92\ ^oC$ أما درجة حرارة الإشباع للمحلول عند ضغط التكثيف ($T_b=80[^oC]$)، وهذه القيم قريبة جداً من القيم الواردة بالجدول أعلاه.

من أجل التأكد من النتائج وتحديد مدى اعتماد Type 210 في المشاريع التي تستخدم دارة التبريد الامتصاصية قمنا بالاستعانة بالبحث التجريبي المشترك بين جامعة برونل في المملكة المتحدة والمعهد التقني العالي في قبرص[23]. حيث يركز البحث على تصميم وتنفيذ وحدة تبريد امتصاصية صغيرة باستطاعة تبريد 1 kW بمرحلة واحدة تستخدم

محلول بروميد الليثيوم–ماء كزوج عامل ودراسة خصائص عناصر الدارة وتقييم أدائها ضمن الظروف التالية: تمت تغذية المولد بالماء الساخن عن طريق سخان كهربائي بدرجة حرارة C˚ 75، تركيز المحلول الغني 60%، تركيز المحلول الفقير 55%، المبادل الحراري للمحلول صغير نسبياً حيث بلغت الناقلية الحراري الإجمالية[W/˚C] 11.1، ودرجة حرارة المبخر [˚C] 6.

يوضح الجدول (6-4)المقارنة بين النتائج التجريبية [23] والنتائج الحسابية التي تم الحصول عليها عند نفس المدخلات في النموذج الحسابي على TRNSYS.

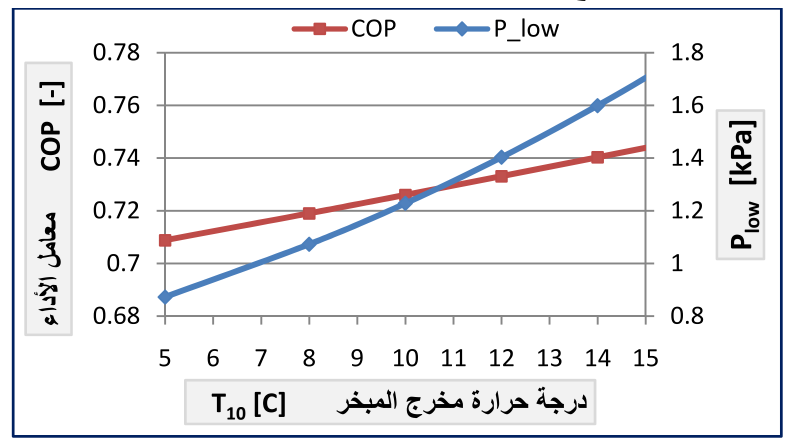
الجدول(6-4) مقارنة بين النتائج الحسابية والنتائج التجريبية [23] للخواص في دارة التبريد الامتصاصية

العنصر *Component*	المتغير *Parameter*	الواحدة *Unit*	النتائج التجريبية *Experimental Results[23]*	النتائج الحسابية *calculated Results*	نسبة الخطأ *Error Ratio|%|*
المكثف *Condenser*	T_7	˚C	70	71	1.41
	T_8	˚C	31.5	32.25	2.33
	P_{high}	kPa	4.82	4.825	0.1
	$\dot{m}_{ref}$	kg/s	0.000431	0.0004208	2.4
	$\dot{Q}_c$	W	1080	1054	2.47
المولد *Generator*	T_3	˚ C	55	54.9	0.18
	X_W	%[-]	55	55	-
	T_4	˚ C	75	75	-
	X_S	%[-]	60	60	-
	$\dot{Q}_g$	W	1360	1337	1.72
المبادل الحراري (الموفر) *Heat Exchanger of solution*	T_2	˚ C	36	34.84	3.33
	T_5	˚ C	52.8	51.45	2.6
	$\dot{m}_{ws}$	kg/s	0.00517	0.005049	2.4
	$\dot{m}_{ss}$	kg/s	0.00474	0.004629	2.4
الماص *Absorber*	T_6	˚ C	45.6	51.45	11.37
	T_1	˚ C	36	34.84	3.33
	P_{low}	kPa	0.9346	0.9354	0.086
	$\dot{Q}_a$	W	1280	1283	0.23
المبخر *Evaporator*	$\dot{m}_{ref}$	kg/s	0.000431	0.0004208	2.43
	$\dot{Q}_e$	W	1000	1000	-
	T_{10}	˚ C	6	6	-
معامل الأداء	*cop*	[-]	0.735	0.748	1.74

نلاحظ التقارب الكبير بين النتائج التجريبية والنتائج الحسابية مما يؤكد إمكانية الاعتماد على عنصر الدارة الامتصاصية عند تصميم هكذا نوع من الأنظمة.

6-2-4-1 تأثير تغيير درجة حرارة المبخر: *Effect of evaporator temperature*

يؤدي تغيير درجة حرارة المبخر– مع ثبات باقي ظروف التشغيل– إلى تغيير ضغط المبخر والماص وبالتالي عند ارتفاع درجة حرارة المبخر يرتفع الضغط المنخفض ويتحسن معامل الأداء للدارة، يوضح المخطط في الشكل (6-18) تغير معامل الأداء للدارة الامتصاصية وضغط المبخر مع تغير درجة حرارة المبخر.



الشكل (6-18) تأثير تغير درجة حرارة المبخر على معامل الأداء وضغط المبخر من أجل القيم التالية للحالة المدروسة: $\dot{Q}_e$=10 [kW] ، T_4=90 [°C]، X_w=55 % ، X_S=60 % .

إضافة إلى أن انخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط المبخر) قد يؤدي إلى تبلور المحلول(Crystallization) المركز عند مدخل الماص، كما أن انخفاض درجة حرارة المبخر عن حدٍّ معين قد يسبب خروج محلول بروميد الليثيوم ماء من الماص عند درجة حرارة أعلى من درجة الاتزان الحراري للمحلول مما يسبب وجود بخار ماء في خط السحب للمضخة وبالتالي توقف الدارة عن العمل.

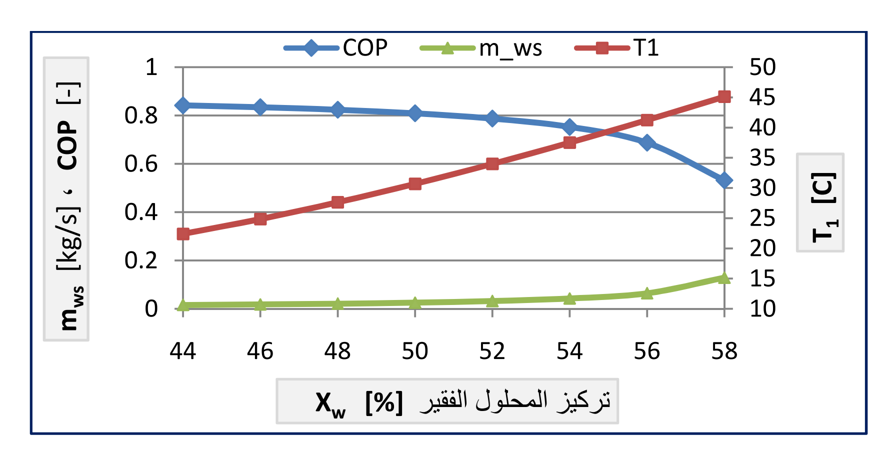
6-2-4-2 تأثير ضغط المكثف: *Effect of condenser pressure*

إن دارة التبريد الامتصاصية تتعرض أثناء التشغيل إلى تغيير درجة حرارة ماء التبريد في المكثف أو الماص تبعاً لظروف الجو المحيط، الذي يؤدي بدوره إلى تغيير ضغط المكثف ارتفاعاً أو انخفاضاً وبالتالي تغير معامل الأداء، حيث يؤدي انخفاض ضغط المكثف (الضغط المرتفع بالدارة) إلى تحسُّن معامل الأداء لكن مع احتمال تعرض الدارة لخطر التبلور إذا انخفضت قيمة الضغط عن الحد الحرج، هذا الحد يمكن استنتاجه من خلال مخطط العلاقة بين درجة حرارة المحلول والضغط عند قيم تركيز مختلفة (الملحق–ب–)، في حالتنا من أجل درجة حرارة المحلول عند مخرج المولد $90\ ^oC$ فإن انخفاض الضغط من 10 [kPa] إلى 4 [kPa] سوف يرفع تركيز المحلول الخارج من المولد إلى حوالي 70% عندها تعاني الدارة من التبلور.

2-4-2-6 تأثير تغيير تركيز بروميد الليثيوم في المحلول :

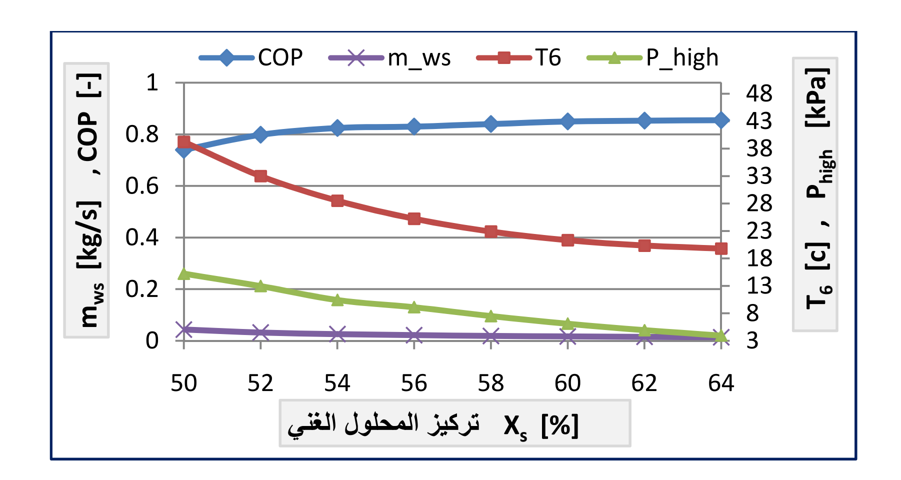
من أجل معرفة تأثير التغير في تركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند مدخل الماص X_w على أداء الدارة سنغير قيم X_w ضمن المجال (45% – 58 %) ونراقب تغير قيم كلٍّ من معامل الأداء ودرجة حرارة المحلول ومعدل التدفق عند مخرج الماص.

يظهر المخطط في الشكل (6-19) أنه من أجل فرق كبير في تركيز المحلول بين المولد والماص فإن معدل التدفق عند مخرج الماص يأخذ أقل قيمة ويزداد مع تناقص الفرق في التركيز بين المحلولين الغني والفقير، أما معامل الأداء فإنه يتناقص مع ازدياد معدل التدفق.



الشكل (6-19) تأثير تغير تركيز المحلول الفقير على كلٍ من معامل الأداء ومعدل تدفق المضخة ودرجة حرارة المحلول عند مخرج الماص مع تثبيت القيم التالية: $\dot{Q}_e$=10 [kW]، T_4=80 [˚C]، T_{10}=10[˚C]، X_S=60 % .

من الناحية الثانية من أجل مراقبة تأثير التركيز القوي للمحلول X_s تمّ تغيير القيم ضمن المجال (50%-65 %) وراقبنا تأثير ذلك على كلٍّ من معامل الأداء ومعدل التدفق من جهة وعلى درجة حرارة المحلول الفقير عند مدخل الماص والضغط المرتفع من جهة ثانية. تظهر النتائج الممثلة بالمخطط (6-20) أنه مع ازدياد الفارق في التركيز بين المحلولين الغني والفقير يتناقص معدل التدفق في المضخة وينخفض الضغط في المولد أما معامل الأداء فإنه يتحسن، ولكن يجب الانتباه إلى أنه عند ارتفاع تركيز المحلول الغني إلى قيمة تزيد عن 68% من أجل نفس الشروط السابقة فإنه سيجعل الدارة تعاني من مشاكل التبلور.

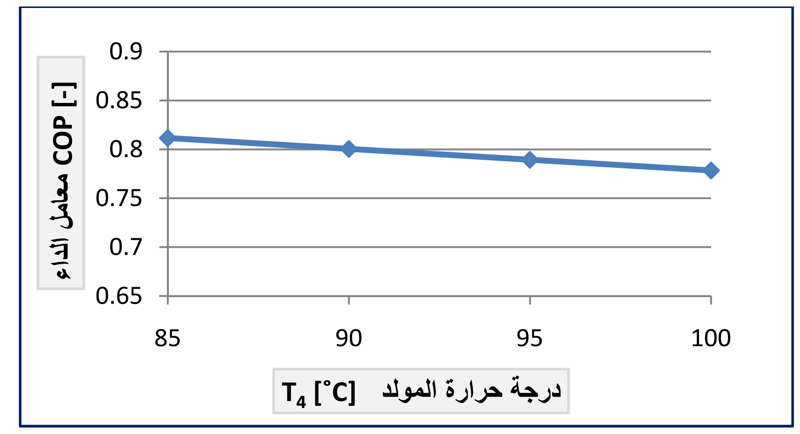


الشكل (6-20) تأثير تغير تركيز المحلول الغني على كلٍّ من معامل الأداء ومعدل تدفق المضخة ودرجة حرارة المحلول عن مدخل الماص والضغط المرتفع مع تثبيت القيم التالية: $\dot{Q}_e$=10 [kW] ، T_4=80[˚C] ، T_{10}=6[˚C] ، X_w=45 % .

3-4-2-6 تأثير درجة حرارة المولد: *Effect of generator temperature*

يعتبر هذا العامل من المتغيرات المهمة المؤثرة على عامل أداء الدارة الامتصاصية، من أجل معرفة تأثير تغير درجة حرارة المولد على معامل الأداء ضمن شروط درجة حرارة مبخر ثابتة وحمل تبريد ثابت فإننا سنغير قيم درجة الحرارة T_4 ضمن المجال(100 –85 ^oC) وملاحظة تغيير معامل الأداء.

يوضح المخطط في الشكل(6-21) أنه مع ارتفاع درجة حرارة المولد تزداد كمية وسيط التبريد المتحرر في المولد وبالتالي يزداد حمل التبريد وبالتالي سيتناقص معامل الأداء.



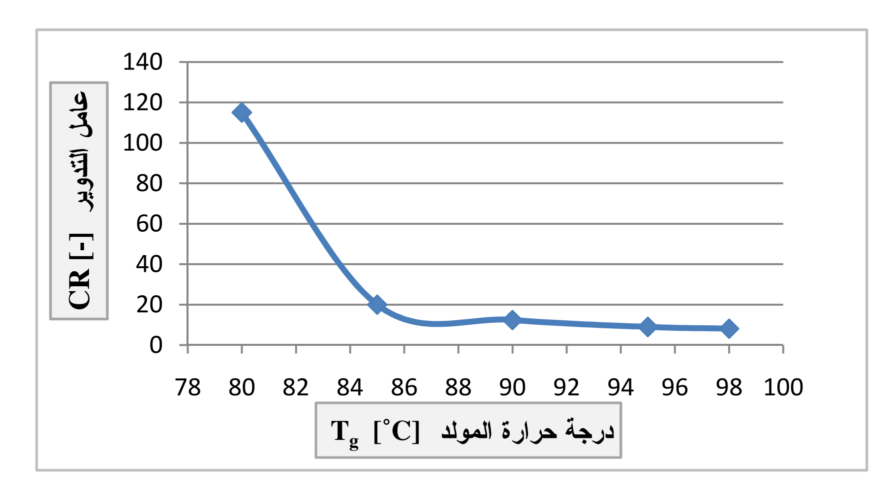
الشكل (6-21) تأثير درجة حرارة المحلول عند مخرج المولد على كلٍّ من معامل الأداء والضغط المرتفع بالدارة عند تثبيت القيم التالية: T_{10}=10[˚C] ، X_w=50 % ، X_s=60 %.

يعتبر عامل التدوير (CR-Circulation Ratio) من العوامل المهمة التي يجب مناقشتها، والتي تمثل نسبة معدل تدفق المحلول الفقير $\dot{m}_{ws}$ إلى معدل تدفق وسيط التبريد $\dot{m}_{ref}$. بقدر ما يكون هذا العامل صغير يكون أفضل من ناحية الطاقة التي تستهلكها مضخة دارة المحلول.

$$CR = \frac{\dot{m}_{ws}}{\dot{m}_{ref}}$$

لدراسة هذا العامل تمّ افتراض أن درجة حرارة التكثيف $T_c = 40°C$، درجة حرارة المبخر $T_e = 6°C$ حمل التبريد $Q_e = 10\ kW$. تم تغيير درجة حرارة المولد ضمن المجال الذي يضمن انفصال بخار الماء عن المحلول وأقل من درجة الحرارة عند حدود التبلور وهي ضمن هذه الافتراضات $78 < T_g < 98\ °C$.

يوضح المخطط في الشكل (6−22) أنه عندما تكون درجة حرارة المحلول 80 فإن معامل التدوير يصل تقريباً إلى 115 وهي قيمة غير مقبولة ولا يمكن تصميم النظام وفق هذه الدرجة. أما مع ارتفاع درجة حرارة المولد يزداد معدل تدفق وسيط التبريد ويتناقص معها معامل التدوير.



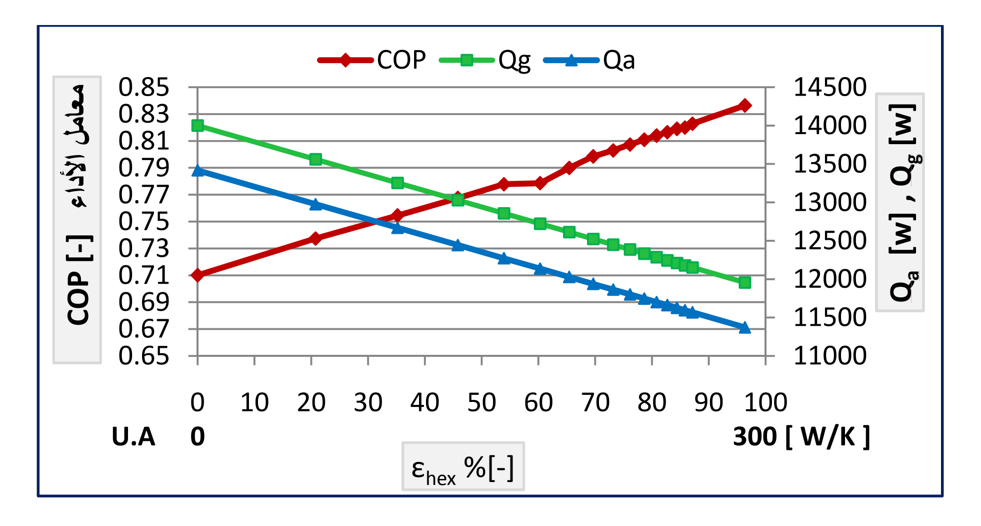
الشكل (6-22) تغيرات معامل التدوير مع تغير درجة حرارة المولد

6-2-4-4 –تأثير فعالية المبادل الحراري للمحلول:

Effect of solution heat exchanger's effectiveness

في المبادل الحراري الخاص بمحلول بروميد الليثيوم ماء تنتقل الحرارة من المحلول الغني المسخن والخارج من المولد إلى المحلول الفقير قبل دخوله المولد مما يساعد على توفير جزء كبير من الطاقة الحرارية ويساعد على تخفيض الحرارة الواصلة إلى الماص وبالتالي يتحسن معامل الأداء للدارة، يمكن التأكد من هذا التأثير إذا راقبنا تغير كلٍّ من معامل الأداء والاستطاعات الحرارية لكل من المولد والوعاء الماص مع تغيير فعالية المبادل

الحراري الممثلة من خلال المتغير $U.A$ ضمن المجال من ε_{hex}=0 (عدم وجود مبادل حراري) إلى القيمة ε_{hex}=97% (تقابل UA=300 W/K)، يوضح المخطط التالي(6-23) تحسُّن معامل الأداء مع ازدياد مساحة التبادل الحراري أي مع ازدياد فعاليته .



الشكل (6-23) تأثير المبادل الحراري للمحلول على معامل الأداء والأحمال الحرارية في المولد والماص عند تثبيت القيم التالية: $\dot{Q}_e$=10 [kW] ، T_{10}=10[˚C] T_4=80[˚C] ، X_w=50 % ، X_s=60 %.

الاستنتاجات والتوصيات

Conclusions and Recommendations

- **تم في هذا البحث دراسة تغذية دارة التبريد الامتصاصية أحادية المرحلة ذات حمل تبريد [kW] 10 بدارة مجمعات شمسية وخزان حراري مع نظام تخزين كهربائي مساعد، وقد تبين من خلال المقارنة الحرارية لأنواع المجمعات الشمسية الثلاث على أساس نسبة التغطية الشمسية والاعتماد الأقل على نظام التسخين المساعد أن المجمعات القطعية ذات فعالية أكثر ومساحة اقل مقارنة بأنواع المجمعات الأخرى ، حيث تبين أن $32\ m^2$ من المجمعات القطعية قادرة على إعطاء نسبة تغطية شمسية خلال فترة التشغيل تصل كقيمة وسطية شهرياً إلى 87% ، بينما عند وصل $32\ m^2$ من المجمعات الأنبوبية المفرغة تصل النسبة إلى % 85.5، بينما مع $65\ m^2$ من المجمعات المسطحة المستوية تصل النسبة إلى % 79.6 ومع ملاحظة أن أسعار المجمعات الشمسية الأنبوبية المفرغة أعلى من الأنواع الأخرى يصبح خيار المجمعات القطعية هو الخيار الأفضل.**
- للحصول على معامل أداء مرتفع للدارة ونسب تغطية شمسية كبيرة (أكبر من 90%) فإن هذا لا يعني المبالغة في زيادة حجم مستودع التخزين الحراري ومساحة المجمعات الشمسية المستخدمة لأن حجم الفائدة (من حيث مدى الاعتماد على التسخين المساعد) المترتب على زيادة هذه القيم فوق القيم المثالية المحددة لن يكون كبيراً ومتناسباً مع الكلفة التأسيسية للنظام.
- استطعنا من خلال محاكاة نظام التبريد الشمسي تحديد أفضل المتغيرات التصميمية والتشغيلية للحالة المدروسة من حيث زاوية ميل ومساحة سطح المجمعات الشمسية ودراسة حساسية دارة التبريد الامتصاصية وتحديد العوامل المؤثرة على أدائها، وأصبح بالإمكان اعتماد هذا النموذج في تصميم هذا النوع من الأنظمة عند أي حمل تبريد.
- تم في هذه الدراسة تقييم أداء دارة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة مع بروميد الليثيوم–ماء كزوج عامل، حيث تبين أنه مع ازدياد الفارق في التركيز بين المحلولين الغني والفقير فإن معدل التدفق يتناقص أما معامل الأداء فإنه يتحسن(ارتفاع الفارق في التركيز بين المحلولين بمقدار10% يسهم في تحسين معامل الأداء بمقدار 9%). مع الانتباه إلى ضرورة ألا يزيد تركيز المحلول الغني عن 70% في حالتنا المدروسة من أجل تفادي مشاكل تبلور المحلول عند مدخل الماص وذلك عن طريق المحافظة على تبريد الماص.

- يظهر هذا التحليل أيضاً أهمية المبادل الحراري (الموفر) في تحسين معامل الأداء حيث تبين أن معامل الأداء يتحسن بنسبة 11% عند إضافة مبادل حراري فعاليته 80%، كما أظهر التحليل أن معامل الأداء يتحسن عند ارتفاع درجة حرارة المبخر.
- أظهرت مقارنة النتائج التجريبية لدارة التبريد الامتصاصية بالنتائج الحسابية المعتمدة على عنصر الدارة الامتصاصية المبرمج على برنامجTRNSYS تقارباً كبيراً وتؤكد إمكانية اعتماده في الأبحاث أو التصاميم المستقبلية التي تعتمد على الدارة الامتصاصية بمرحلة واحدة وتستخدم بروميد الليثيوم–ماء كزوج عامل.
- في الأبحاث المستقبلية، من المهم إجراء دراسة للجدوى الاقتصادية تأخذ بالحسبان التكاليف الأولية التأسيسية للتجهيزات وتكاليف التشغيل والصيانة و التركيب ومقدار الفوائد المترتبة على التجهيزات أو منطقة وضع المجمعات وثمن التجهيزات في نهاية عمرها الفني من شأنه أن يحدد إمكانية تطبيق هذا النظام عملياً وفق التصميم المقترح في المباني السكنية.

أخيراً نذكر أن مقارنة التكاليف الإجمالية للنظام تحتاج لدراسة اقتصادية كاملة وهي خارج نطاق بحثنا، مع ملاحظة أن مراعاة المشاكل البيئية المترتبة على حرق الوقود الأحفوري يجب أن يرجح اختيارنا للطاقة الشمسية في التبريد حتى ولو وجدت هوامش ربحية ترجح الأنظمة التقليدية الأخرى المضرّة بالبيئة. ومن المؤكد أن ربحية استخدام الطاقة الشمسية لأغراض التبريد والتكييف ستكون أكبر مع استمرار ارتفاع أسعار الطاقة والكهرباء من جهة ومع انخفاض أسعار المجمعات الشمسية من جهةٍ أخرى .

الملحق – أ –

Appendix-A

المعادلات الخاصة بحساب الزوايا الشمسية وشدة الإشعاع الشمسي

The Equations of calculating the solar angles and Solar Radiations Intensities

أ-1- زاوية الساعة الشمسية : *Solar Hour Angle*

$$\omega = 15(t - 12) \qquad \text{(a-1)}$$

حيث t الزمن بالساعة حسب التوقيت الشمسي (تنعدم عند الظهيرة وتكون موجبة لأوقات ما بعد الظهر) .

أ-2- زاوية الميل الشمسي : *Solar declination angle*

$$\delta = 23.45\ \sin[\frac{360}{365}(284 + n)] \qquad \text{(a-2)}$$

حيث n ترتيب اليوم وفق التقويم الميلادي .

أ-3- زاوية السمت الشمسي الرأسية :*Solar Zenith angle*

$$\cos\theta_Z = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega \qquad \text{(a-3)}$$

حيث φ : زاوية خط العرض *Latitude angle* .

ω : زاوية الساعة (تبلغ القيمة صفراً عند الظهر الشمسي وتكون سالبة بالصباح).

أ-4- زاوية الارتفاع الشمسي α : *Solar Altitude*

$$\sin\alpha = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega \qquad \text{(a-4)}$$

$$\theta_Z = 90° - \alpha$$

أ-5- زاوية الارتفاع الشمسي الأفقية γ_S: *solar azimuth angle*

$$\sin\gamma_S = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\sin\theta_Z} \qquad \text{(a-5)}$$

أ-6- زاوية سقوط الأشعة الشمسية *Incidence angle* :

$$\cos\theta = \sin\delta\ (\cos\beta\sin\phi - \sin\beta\cos\phi\cos\gamma) + \cos\delta\cos\omega\,(\cos\beta\cos\phi + \sin\beta\cos\phi\sin\gamma) + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega$$
(a-6)

أ-7- زاوية ميل السطح β :*Slope of surface*

الزاوية بين السطح المستقبل للأشعة الشمسية والمستوي الأفقي المحلي .

أ-8- زاوية سمت السطح الأفقية γ : *Azimuth angle of surface*

الزاوية المحصورة بين مسقط الخط العمودي على السطح على المستوي الأفقي المحلي واتجاه الجنوب، تكون γ موجبة إلى الغرب وتسمى اختصاراً اتجاه السطح .

أ-9- شدة الإشعاع الشمسي الكلي على سطح أفقي :
Total radiation on horizontal surface

وفق نموذج *ASHRAE* للسماء الصحو فإن :

$$I = I_b + I_d \qquad \text{(a-7)}$$

حيث I_b : شدة الإشعاع الشمسي المباشر على سطح أفقي
Beam radiation on a horizontal surface

I_d : شدة الإشعاع الشمسي المنتشر على سطح أفقي
Diffuse radiation on a horizontal surface

$$I_b = I_{bn}\cos\theta_Z \qquad \text{(a-8)}$$

حيث I_{bn} شدة الإشعاع الشمسي العمودي المباشر
Beam radiation at normal incidence

$$I_{bn} = A\,.\,exp\left(\frac{-B}{\cos\theta_Z}\right) \qquad \text{(a-9)}$$

$$I_d = C.I_{bn} \qquad \text{(a-10)}$$

حيث A : القيمة الظاهرية لشدة الأشعة الشمسية عند كتلة هوائية صفرية .

B : معامل التوهين (التخفيف)الجوي للإشعاع الشمسي .

C : معامل الأشعة المنتشرة .

تختلف قيم هذه الثوابت من شهرٍ لآخر ، حيث ثمة جداول تحدد قيم هذه المعاملات عند ظروف السماء الصحو (ASHRAE 97).

أ-10- شدة الإشعاع الشمسي على سطح مائل :

$$I_t = I_{bt} + I_{dt} + I_{gt} \qquad \text{(a-11)}$$

t : تشير إلى السطح المائل .

b : تشير للإشعاع الحزمي .

d : تشير إلى الإشعاع المنتشر .

g : تشير إلى الإشعاع المنعكس من سطح الأرض، والذي يستقبله السطح المائل .

$$I_{bt} = R_b . I_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} I_b \qquad \text{(a-12)}$$

حيث$0 < |\theta| < 90$.

أما R_b :فهو معامل الشكل *geometrical factor* ويمثل نسبة الإشعاع الحزمي الذي يستقبله السطح المائل إلى الإشعاع الحزمي الذي يستقبله السطح الأفقي .

$$cos\,\theta = cos\,\theta_z\, cos\,\beta + sin\,\theta_z\, cos(\gamma_s - \gamma). sin\,\gamma \qquad \text{(a-13)}$$

$$I_{gr} = \rho_g . I . Sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) = R_r . I \qquad \text{(a-14)}$$

حيث ρ_g : انعكاسية السطح *ground reflectance* .

R_r : نسبة الإشعاع المنتشر الذي يستقبله السطح المائل إلى الإشعاع المنتشر الذي يستقبله السطح الأفقي .

$$I_{dt} = I_d . R_d \qquad \text{(a-15)}$$

$$R_b = \frac{1 + cos\,\theta}{2} \qquad \text{(a-16)}$$

يتم حساب النسبة $\frac{I_{dt}}{I}$ باستخدام نموذج واحد من نموذجين أساسيين، أولهما نموذج الانتشار المتماثل والثاني نموذج الانتشار غير المتماثل .

يفترض النموذج الأول أن إشعاعية السماء منتظمة في كل اتجاه ولا يعتمد على زاوية السمت بحيث تكون النسبة مساوية لمعامل الشكل بين السطح المائل والسماء :

$$\frac{I_{dt}}{I} = \frac{1 + \cos\beta}{2} = Cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \qquad \text{(a-17)}$$

أما نموذج الانتشار الغير المتماثل فيستخدم في حالات الجو الغائم وتكون النسبة :

$$\frac{I_{dt}}{I} = Cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) . \left\{1 + F . Sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right\} [1 + F . Cos^2 . Sin^3\theta_z] \qquad \text{(a-18)}$$

حيث F يعطى بالعلاقة :

$$F = 1 - \left(\frac{I_d}{I}\right)^2 \qquad \text{(a-19)}$$

أ-11- الأداء الحراري للمجمعات الشمسية:

يمكن الحصول على المعادلة العامة لمردود المجمع الشمسي من معادلة (هوتيل– ويلر) التالية :

$$\eta = \frac{Q_u}{A.I_t} = \frac{\dot{m}_{coll}.C_{pf}.(T_o - T_i)}{A.I_t} \quad \text{(a-20)}$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A.I_t} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I_t} - F_R.U_{L/T}.\frac{(T_i - T_a)^2}{I_t} \quad \text{(a-21)}$$

$$\eta = a_0 - a_1.\frac{\Delta T}{I_t} - a_2.\frac{(\Delta T)^2}{I_t} \quad \text{(a-22)}$$

حيث η : المردود الحراري للمجمع الشمسي .

Q_u : الطاقة الحرارية التي تصل إلى المائع $[W]$.

I_t : الإشعاعي الكلي الوارد على السطح العلوي للمجمع $[\frac{W}{m^2}]$.

A : مساحة المجمع الإجمالية $[m^2]$.

$\dot{m}_{coll}$: معدل تدفق المائع في المجمع $[\frac{kg}{s}]$

C_{pf} : السعة الحرارية النوعية للمائع $[\frac{kj}{Kg.k^{\circ}}]$.

T_o : درجة حرارة المائع عند خروجه من المجمع [ºC].

T_i : درجة حرارة المائع عند دخوله المجمع [ºC].

F_R : معامل إزالة الحرارة(*Heat Removal factor*).

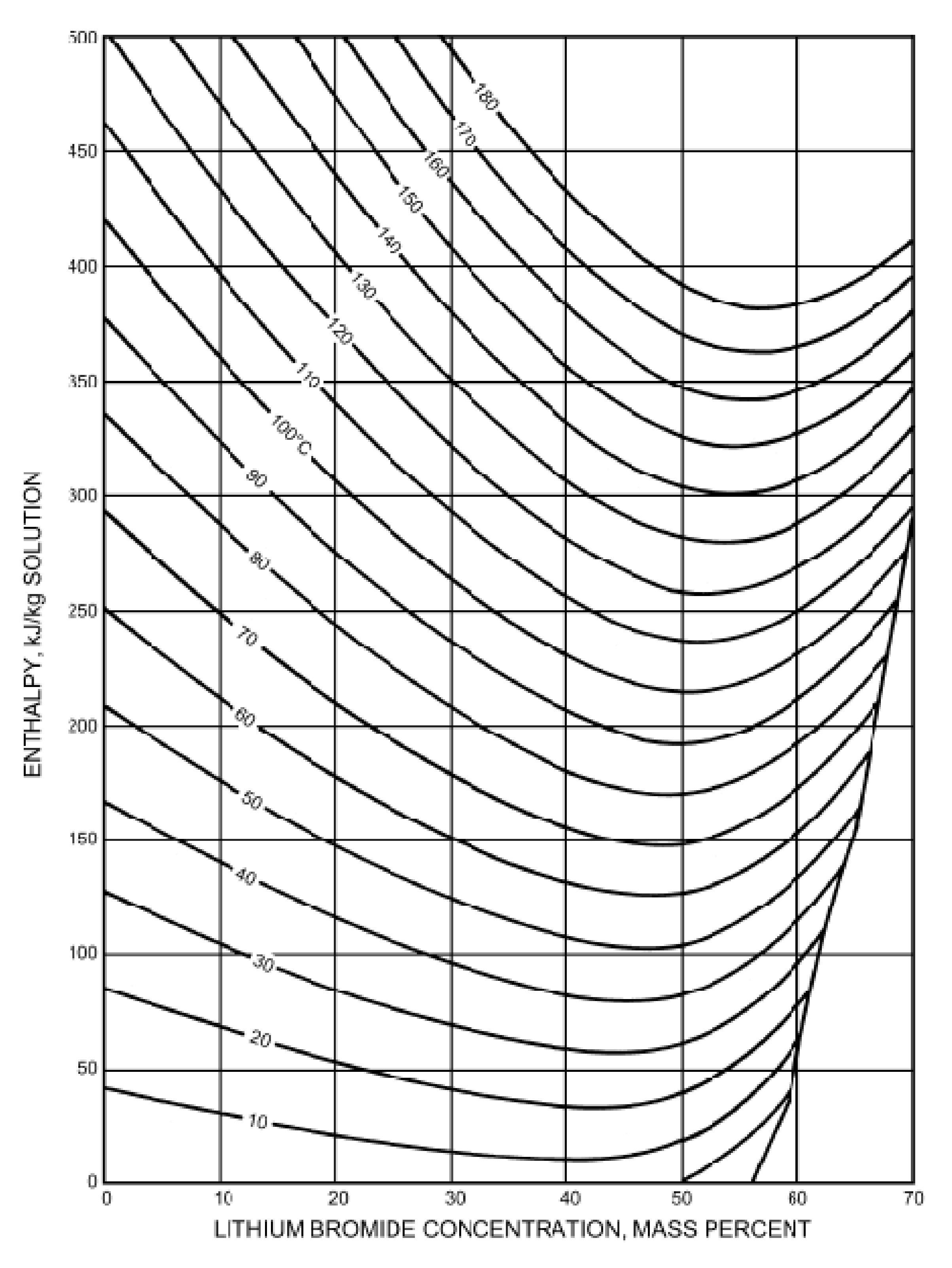
$(\tau\alpha)$: جداء معامل النفاذية للغطاء بمعامل الامتصاصية للسطح .

$(\tau\alpha)_n$: جداء معامل النفاذية بمعامل الامتصاصية عند السقوط الناظمي (العمودي) .

U_L : معامل الضياع الحراري الإجمالي لكل وحدة مساحة من المجمع $[\frac{kj}{h.m^2.k}]$.

T_a : درجة حرارة الجو المحيط [ºC].

$U_{L/T}$: معامل الضياع الحراري المعتمد على درجة الحرارة T.



الشكل(ب–1) مخطط الانتالبي – تركيز لمحلول بروميد الليثيوم– ماء.

REFRIGERANT TEMPERATURE, °C

SATURATION PRESSURE (P), kPa

SOLUTION TEMPERATURE, °C

0 30% 40% 50% 60% 70%

الشكل(ب–2) مخطط التوازن لمحلول بروميد الليثيوم/ ماء.